

T 8/30

TESIS DOCTORAL



UNIVERSIDAD DE GRANADA
Facultad de Ciencias
Fecha 23-5-2002
ENTRADA NUM. 1879

UNIVERSIDAD DE GRANADA
14 MAYO 2002
COMISION DE DOCTORADO

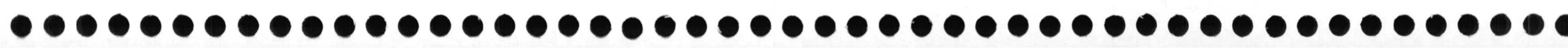
UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE GEODINÁMICA-INSTITUTO DEL AGUA

CONTRIBUCIÓN HIDROGEOLÓGICA Y LIMNOLÓGICA A LA CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE ZONAS HÚMEDAS DE ANDALUCÍA ORIENTAL

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
GRANADA
N.º Documento 613384533
N.º Copia 16008996

MIGUEL RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ
GRANADA, 2002

[Handwritten signature]



José Javier Cruz San Julián (Catedrático de Geodinámica), José Benavente Herrera (Profesor Titular de Geodinámica) y Luis Cruz Pizarro (Catedrático de Ecología), con destino docente en la Universidad de Granada y adscritos al Instituto del Agua de dicha Universidad:

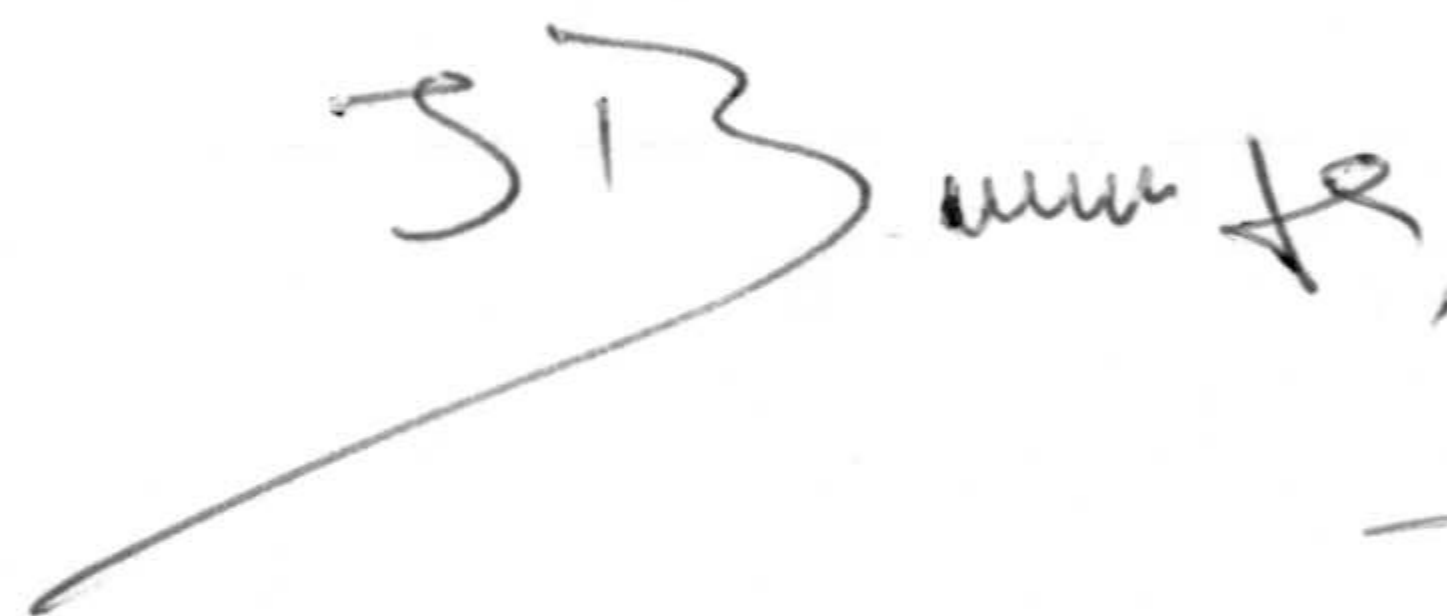
CERTIFICAN:

Que la presente Memoria, titulada "*Contribución hidrogeológica y limnológica a la caracterización ambiental de zonas húmedas de Andalucía Oriental*" ha sido realizada bajo nuestra dirección por D. Miguel Rodríguez Rodríguez y que cumple, a nuestro juicio, los requisitos necesarios para que su autor pueda optar al grado de Doctor en Ciencias Geológicas. Lo que certificamos a los efectos oportunos.

Granada, abril de 2002



J.J. Cruz San Julián



J. Benavente Herrera



L. Cruz Pizarro

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Quisiera, en primer lugar, agradecer a mis directores Dr. José Javier Cruz San Julián, Catedrático de Geodinámica; Dr. Luis Cruz Pizarro, Catedrático de Ecología y Dr. José Benavente Herrera, Profesor Titular de Geodinámica, todos ellos de la Universidad de Granada, la enorme confianza que depositaron en mí al principio y durante todo el tiempo durante el que se desarrolló este trabajo de investigación. Sin las orientaciones que, en sus respectivos campos, he recibido de cada uno de ellos, hubiera sido imposible la elaboración de esta Tesis Doctoral. Sinceramente, gracias por haber compartido conmigo parte de vuestra dilatada experiencia en los campos de la Hidrogeología y la Limnología.

Esta investigación se ha llevado a cabo gracias a dos becas, la primera de ellas con cargo al proyecto suscrito entre la Universidad de Granada y la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, "Caracterización hidroquímica y cartografía de las zonas húmedas de Cádiz, Málaga y Almería", de dos años de duración (1997-98); y la segunda, del Plan Nacional de Formación del Personal Investigador del Ministerio de Educación y Cultura, Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica (año 1999, código AP9844259448).

He de expresar también mi gratitud al Departamento de Geodinámica, en el seno del cual he realizado mis estudios de doctorado, al de Biología Animal y Ecología por facilitarme apoyo (logístico y humano), especialmente al profesor Rafael Morales Baquero, al de Estadística e Investigación Operativa, concretamente al profesor Francisco de Asís Torres Ruiz por su inestimable ayuda en todo lo relacionado con la estadística incluida en este trabajo; y, finalmente, a todos los compañeros del Instituto del Agua, de los cuales me gustaría resaltar especialmente a Kaltoum El Mabrouki, Daniel Fabián, M^a Victoria Amores, Inmaculada de Vicente, Isabel Rodríguez, Sergio Rodrigues, Miguel Angel Gómez, Juan Gálvez, Clementina Pozo, Belén Juárez y otros que actualmente no están en el Instituto, pero con los que he compartido gratificantes discusiones acerca de diferentes aspectos de esta investigación, Dr. Francisco Padilla y Dr. José Luis García: gracias por vuestra ayuda y consejos. También a los químicos analíticos Salvador y Beatriz, por los análisis.

Mi más sincera gratitud a los profesores Dr. Antonio Castillo Martín, Dra. Carmen Almécija Ruiz, y Dra. Mari Carmen Hidalgo Estévez por su apoyo e interés hacia esta investigación.

Muchas han sido las personas que me han ayudado en las jornadas de campo en las lagunas, en ocasiones bajo condiciones meteorológicas adversas, sin las cuales este trabajo hubiese sido menos agradable de llevar a cabo: al ingeniero Peter Schwer, por sus continuos consejos y ayuda; a la hidrogeóloga Anke Hermans, por su disponibilidad e interés; a los geólogos Volkmar Plagentz y Frank Dethlefsen, por su colaboración e ideas sobre la compleja geología de la zona de Campillos, a la geóloga Gracia Gómez y a la bióloga María Jiménez, por su amistad y apoyo; a ellos y a todos los que en alguna ocasión me acompañaron en estos muestreos, gracias.

Al profesor Abdelkader Larabi, de la Universidad Mohammed V - Agdal (Rabat), y a su equipo, por su interés y consejos acerca del acuífero de Fuente de Piedra durante mi estancia en esta ciudad.

Al profesor Edward Maltby, de la Universidad de Londres, por su hospitalidad durante mi paso por el Royal Holloway Institute for Environmental Research, y a sus doctorandos Mat Simpson y Craig Turner.

A la profesora Kristine Walraevens y al investigador Marc Van Camp, de la Universidad de Gante, por su ayuda en todo lo relacionado con el apartado de modelización de flujo de este trabajo.

Al profesor Joan Armengol Bachero, de la Universidad de Barcelona, por su colaboración con relación a la realización de balances térmicos.

Quisiera dejar constancia de mi agradecimiento a todo el personal del Patronato de la Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra y, en especial, a su Director, el Dr. Manuel Rendón Martos, por su colaboración y disponibilidad en todo lo relativo al acceso a la Reserva y a los datos meteorológicos de la estación del Cerro del Palo.

Agradezco, por último, a mis padres, hermano y al resto de mi familia y amigos su apoyo incondicional y su disponibilidad permanente en todo lo relativo a la realización de esta Tesis.

CONTRIBUCION HIDROGEOLOGICA Y LIMNOLOGICA A LA
CARACTERIZACION AMBIENTAL DE ZONAS HUMEDAS DE ANDALUCIA
ORIENTAL

1. INTRODUCCION

1.1. Presentación	1
1.1.1. Planteamiento general del trabajo	1
1.1.2. Terminología utilizada en esta Memoria	1
1.1.3. Aspectos generales de la gestión de humedales	4
1.2. Antecedentes	6
1.2.1. Lagunas de Fuente de Piedra, Campillos y Archidona. (Norte de la provincia de Málaga)	6
1.2.2. Albuferas de Adra y desembocadura del Guadalhorce	8
1.3. Descripción de los humedales estudiados	9
1.3.1. Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra	9
1.3.2. Reserva Natural Laguna de la Ratoša	10
1.3.3. Reserva Natural Lagunas de Campillos	11
1.3.4. Reserva Natural Lagunas de Archidona	14
1.3.5. Lagunas de Antequera	15
1.3.6. Paraje Natural Desembocadura del Guadalhorce	16
1.3.7. Reserva Natural Albuferas de Adra	17
1.4. Objetivos del estudio	18
1.4.1. Generales	18
1.4.2. Parciales	19

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS VERTIENTES

2.1. Planteamiento del trabajo y metodología	20
2.2. Rasgos geográficos	22
2.3. Clima	24
2.4. Geología	26
2.4.1. Introducción: la Cordillera Bética	26
2.4.2. Estratigrafía y estructura de las cuencas de las lagunas estudiadas y sectores adyacentes	29
2.4.3. Estudios geológicos específicos	30
2.4.3.1. Reserva Natural Lagunas de Campillos	30
2.4.3.2. Reserva Natural Albuferas de Adra	38
2.4.4. Geomorfología	42
2.4.4.1. Lagunas kársticas	42
2.4.4.2. Lagunas esteparias, karstificación superficial	43
2.4.4.3. Lagunas costeras	44
2.5. Vegetación	46
2.6. Usos del territorio	49

3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS LAGUNAS

3.1. Morfometría	51
3.1.1. Metodología	51
3.1.2. Morfometría de las lagunas estudiadas	51
3.1.3. Relación de algunos parámetros morfométricos con la dinámica de las lagunas	51
3.2. Hidrología	60
3.2.1. Metodología	60

3.2.2. Evolución de niveles de agua superficial y subterránea	63
3.2.3. Clasificación hidrológica	72
3.2.3.1. Régimen hídrico e hidroperiodo	72
3.2.3.2. Balances hídricos	74
3.3. Régimen térmico de las lagunas	84
3.3.1. Metodología	84
3.3.2. Termoclina	88
3.3.3. Estabilidad de la columna de agua	89
3.3.4. Balances térmicos	98
3.4. Características de los sedimentos del fondo lagunar	105
3.4.1. Metodología	105
3.4.2. Características texturales, conductividad eléctrica y materia orgánica	106
3.4.3. Descripción mineralógica y geoquímica	108
3.4.4. Metales pesados	111

4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA

4.1. Metodología	113
4.1.1. Características químicas	113
4.1.2. Análisis estadístico	113
4.2. Concentración iónica	114
4.2.1. Evolución espacio - temporal de la conductividad y la salinidad en aguas superficiales y subterráneas	115
4.2.1.1. Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra	117
4.2.1.2. Reserva Natural Laguna de la Ratosa	120
4.2.1.3. Reserva Natural Lagunas de Campillos	122
4.2.1.4. Reserva Natural Lagunas de Archidona	125
4.2.1.5. Lagunas de Antequera	125
4.2.1.6. Paraje Natural Desembocadura del Guadalhorce	126
4.2.1.7. Reserva Natural Albuferas de Adra	127
4.2.2. Clasificación de los humedales según su salinidad	128
4.3. Composición iónica	129
4.3.1. Evolución de la concentración de iones mayoritarios en aguas superficiales	132
4.3.2. Clasificación de los humedales según su facies hidroquímica	133
4.3.2.1. Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra	133
4.3.2.2. Reserva Natural Laguna de la Ratosa	134
4.3.2.3. Reserva Natural Lagunas de Campillos	135
4.3.2.4. Reserva Natural Lagunas de Archidona	140
4.3.2.5. Lagunas de Antequera	140
4.3.2.6. Paraje Natural Desembocadura del Guadalhorce	141
4.3.2.7. Reserva Natural Albuferas de Adra	142
4.4. Evolución del pH, alcalinidad, oxígeno disuelto, clorofila "a" y nutrientes	143
4.4.1. Evolución del pH	144
4.4.2. Evolución de la alcalinidad	144
4.4.3. Evolución del contenido en oxígeno disuelto	147
4.4.4. Evolución de la concentración en clorofila "a"	149
4.4.5. Dinámica de nutrientes y estado trófico	150
4.4.5.1. Evolución del contenido en nutrientes	150
4.4.5.2. Dinámica de la relación N/P	157
4.4.5.3. Estado trófico de los humedales	158

4.4.6. Variaciones diarias	159
4.5. Metales pesados y pesticidas	164
4.5.1. Metales pesados	164
4.5.2. Pesticidas	165
4.6. Análisis estadístico	166
4.6.1. Análisis Factorial paramétrico exploratorio y Cluster por variables	166
4.6.2. Análisis cluster por individuos, métodos jerárquicos	167
4.6.3. Análisis cluster no jerárquico	167
5. MODELIZACIÓN	
5.1. Introducción y objetivos de la modelización numérica	169
5.2. Metodología	171
5.2.1. Modelo digital del terreno	171
5.2.2. Modelización de flujo y transporte de solutos	172
5.3. Aplicación del modelo a la laguna de Fuente de Piedra	173
5.4. Resultados de la simulación numérica de la recarga salina profunda en la laguna de Fuente de Piedra	174
6. CALIDAD AMBIENTAL DE LOS HUMEDALES ESTUDIADOS	
6.1. Factores de tensión que afectan al medio	177
6.2. Diagnóstico de la calidad ambiental	181
6.3. Plan de seguimiento y control	185
7. CONCLUSIONES	190
8. BIBLIOGRAFÍA	194

INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación

1.1.1. Planteamiento general del trabajo

En esta Memoria se presentan los resultados del trabajo de Tesis Doctoral relativos al estudio hidrogeológico y limnológico de una serie de zonas húmedas de las provincias de Málaga y Almería. El trabajo incluye, en total, 18 de estos ecosistemas que, salvo cuatro de ellos, se encuentran protegidos como espacios naturales por la Ley autonómica 2/89 de la Junta de Andalucía.

La pérdida de zonas húmedas en todo el mundo en las últimas décadas ha desembocado en una concienciación generalizada sobre su importancia tanto económica como ecológica, y en la necesidad del desarrollo de una gestión razonable de las mismas (Maltby, 1986; Williams, 1990). Los valores más importantes que poseen las zonas húmedas son los siguientes (Leitch, 1989; Williams, 1990): atenuamiento y control de crecidas, retención de sedimentos, asimilación de nutrientes, recarga subterránea, y hábitat de una gran diversidad de especies.

El mantenimiento de estos ecosistemas acuáticos depende en gran medida de procesos hidrológicos, lo cual ha sido ampliamente reconocido en la bibliografía (Gosselink y Turner, 1978; Odum, 1984). Para una correcta gestión y protección de estos ecosistemas es necesario conocer cuales son sus funciones específicas. La investigación multidisciplinar en estos lugares es imprescindible para obtener la información necesaria sobre aspectos hidrológicos, ecológicos, hidroquímicos, geológicos y edafológicos, entre otros, ya que una información sesgada puede resultar en una incorrecta interpretación del funcionamiento del humedal.

Estas circunstancias justifican plenamente la realización de estudios hidrogeológicos y limnológicos integrados, lo cual es precisamente el planteamiento de este trabajo, que se suma a otros realizados con anterioridad en la Universidad de Granada relativos a algunas de las áreas que forman parte de la investigación que aquí se presenta, como el acuífero de Fuente de Piedra (Linares, 1990; Almécija, 1997) o el acuífero del delta del río Adra (El Amrani, 1997).

El trabajo se ha realizado en el Instituto del Agua de la Universidad de Granada, en el marco del Programa de Doctorado "Recursos Hídricos y Geoambientales" del Departamento de Geodinámica. Se ha contado también con la colaboración de otros Departamentos de la Universidad de Granada, muy en particular los de Biología Animal y Ecología, de Edafología y Química Agrícola, de Mineralogía y Petrología y de Estadística e Investigación Operativa. Algunos de los resultados de esta investigación se han obtenido total o parcialmente en otras universidades, durante la realización de estancias de investigación: el Royal Holloway Institute for Environmental Research (Universidad de Londres), la Universidad Mohammed V-Agdal (Rabat) y el Laboratory for Applied Geology and Hydrogeology (Universidad de Gante).

1.1.2. Terminología utilizada en esta Memoria

La terminología utilizada específicamente en limnología es muy amplia, de manera que términos tales como "medio palustre", "zona húmeda", "lago", "laguna" o "playa" se utilizarán en el texto de manera profusa, lo cual hace conveniente una revisión general de las distintas definiciones que de estos vocablos existe en la bibliografía.

Las definiciones del concepto de "lago" son muy numerosas y los diversos autores las han establecido en relación a ciertos criterios que son a menudo diferentes de uno a otro; ente dichos criterios se encuentran, sin pretender una relación exhaustiva, características tales como profundidad, salinidad, conexión con el mar, origen, importancia de la vegetación, etc. Si se considera la profundidad como el criterio básico para clasificar sistemas acuáticos, algunos autores han establecido diferencias entre lagos en sentido estricto y otras masas menores de agua estancadas en tierra firme; a estas últimas se las denomina como medios palustres. En los medios palustres (Arche, 1992) la escasa profundidad permitiría la instalación de vegetación que, en ocasiones, podría extenderse por toda la lámina de agua. Es lo que ocurre en la mayoría de las lagunas incluidas en este estudio.

En las definiciones de lago quedan incluidas masas de agua de características muy dispares, desde lagos de cientos de kilómetros cuadrados de extensión hasta pequeños lagos que pueden ser permanentes o efímeros (lagos de tipo "playa" de Australia o EE.UU.). Esta heterogeneidad de los lagos se encuentra también en el registro fósil (Arche, 1992), en el que se pueden observar pequeños episodios lacustres en sucesiones predominantemente fluviales, o bien potentes depósitos originados en lagos que tuvieron miles de kilómetros cuadrados de extensión.

Si se considera como criterio de clasificación el origen, Hutchinson (1957) distingue hasta 76 tipos diferentes de lagos que pueden ser: tectónicos, volcánicos, por deslizamiento de tierras, glaciales, por disolución, fluviales, eólicos, parálisis, orgánicos y por impacto meteorítico, entre otros. Esta clasificación tiende a ser regional, ya que el autor clasifica los lagos según una serie de procesos que tienen lugar en determinadas zonas de la tierra.

Una clasificación más sencilla (Collinson *et al.*, 1981) establecen dos grandes grupos de lagos en función del tamaño: los *lagos pequeños* (de llanuras aluviales, costeras, deltas, etc.), formados por erosión local, disolución (como algunos de los incluidos en este estudio, aunque otros son relativamente grandes como la laguna de Fuente de Piedra), o estancamiento sedimentario; suelen ser de vida corta y colmatación relativamente rápida. El otro grupo es el constituido por los *grandes lagos*, que generalmente poseen un origen tectónico, aunque el autor diferencia las áreas tectónicamente activas (como los lagos del Rift, en África oriental) y los lagos de áreas cratónicas con hundimiento lento y prolongado (como el lago T Chad, en África central).

De los 15 enclaves lagunares interiores que se han incluido en este estudio, solamente uno, por ser permanente, podría considerarse un lago en sentido estricto, si bien, en atención a su reducido tamaño, se denomina laguna: la Grande de Archidona. Los otros dos sistemas permanentes son los costeros: las albuferas de Adra y el complejo lagunar de la desembocadura del río Guadalhorce. Los demás no pueden considerarse como lagos en sentido estricto, ya que la inmensa mayoría no son permanentes, sino estacionales, y sus profundidades medias no superan los 3 m. La

definición más adecuada para este tipo de ecosistemas es la de *zonas húmedas* o *humedales* ("wetlands").

La ley de Aguas (ley 29/1985, de 2 de agosto) considera como *zonas húmedas* las "*zonas pantanosas y encharcadizas, incluso las creadas artificialmente*" (art. 103.1). En el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 849/1986, de 11 de abril) se recoge bajo la denominación general de zonas húmedas a "*las marismas, turberas o aguas rasas, ya sean permanentes o temporales, estén integradas por aguas remansadas o corrientes y ya se trate de aguas dulces, salobres o salinas, naturales o artificiales*" (art. 275.2).

Estas definiciones, al estar redactadas con fines legales, tienden a simplificar en exceso el concepto. Las definiciones en textos científicos, por ejemplo la elaborada por el "Fish and Wildlife Service" de EE.UU. en 1979, suelen incluir los siguientes atributos:

- las zonas húmedas se caracterizan por la presencia de agua, ya sea en superficie o a escasa profundidad.
- las zonas húmedas presentan características edáficas únicas que las diferencian de los terrenos adyacentes.
- las zonas húmedas mantienen una vegetación adaptada a las condiciones de saturación hídrica de los suelos.

Definiciones en textos internacionales, como la del Convenio de Ramsar sobre "Protección de zonas húmedas de importancia internacional" de 2 de febrero de 1971 (modificada en el protocolo de París, de 3 de diciembre de 1982), califican a estas zonas como "*...las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros*". Esta definición resulta quizá demasiado amplia, ya que aplicada estrictamente incluiría, por ejemplo, los arrecifes de coral.

Para la Agencia de Protección Ambiental americana (EPA) se trata de "*áreas inundadas o saturadas por aguas superficiales o subterráneas, con una frecuencia o duración suficientes para mantener a una vegetación especialmente adaptada para la vida en suelos hidromorfos*" (CFR 230.3).

En textos elaborados en nuestro país para servir de guía metodológica para estudios del medio físico (MOPT, 1992), se define a las zonas húmedas como "*terrenos que se inundan con las aguas de los ríos o del mar (marismas o marjales), el ascenso de la capa freática o la baja permeabilidad del terreno (tremedales, turberas)*"

Más recientemente, el MOPTMA (1995) definió a los humedales como "*el resultado de la interacción de múltiples factores - geológicos, climáticos e, incluso, antrópicos - que dan lugar a zonas de concentración de escorrentías, más o menos desarrolladas y evidentes, cuya alimentación - superficial, subterránea o la combinación de ambas, que es lo más frecuente - permite el mantenimiento de una cierta lámina de agua*".

Una de las definiciones más completas del término "zona húmeda" es la de González Bernáldez y Montes (1989), en la que se contemplan los tres factores fundamentales ya mencionados (agua, suelo y vegetación):

"Un humedal es una unidad geográfico - funcional del medio natural, es decir, un ecosistema, que no siendo un río, ni un lago, ni el medio marino, constituye en el espacio y en el tiempo una anomalía hídrica positiva respecto a un entorno más seco. La confluencia de factores climáticos, geológicos, geomorfológicos e hidrológicos hace que se generen condiciones recurrentes de inundación o saturación, cerca o en la superficie del substrato, lo suficientemente importantes como para afectar a los procesos físicos, químicos y biológicos del área en cuestión. Generalmente, estas propiedades se traducen también en aprovechamientos humanos diferentes y en un paisaje con un elevado grado de calidad visual respecto a los terrenos adyacentes.

Tres elementos son claves para la identificación y delimitación de un humedal:

1) la presencia, de forma permanente, temporal o errática, de una lámina de agua poco profunda o la presencia, de una forma recurrente, de una zona saturada de agua próxima, al mismo nivel o por encima de la superficie del terreno

2) la presencia de suelos hídricos

3) la existencia de una vegetación de hidrófitos

Los humedales pueden presentar estos tres elementos básicos, o sólo alguno de ellos cuando por determinadas condiciones físico - químicas, biológicas o antropogénicas hayan sido eliminados o no se den las condiciones para su desarrollo. "

Por último, cabe destacar que, si bien las anteriores definiciones son válidas para una amplia gama de zonas húmedas, las lagunas estudiadas podrían definirse más exactamente con el término "playa" en sentido geomorfológico: depresión plana y endorreica que se inunda tras periodos lluviosos, comunes en zonas de clima árido y semiárido (el lago Eyre en Australia o el Gran Lago Salado de Utah son ejemplos de grandes "playas").

1.1.3. Aspectos generales de la gestión de humedales

En la provincia de Málaga hay cuatro zonas húmedas protegidas como Reservas Naturales (laguna de Fuente de Piedra, lagunas de Campillos, laguna de la Ratosa y lagunas de Archidona) y una como Paraje Natural (Desembocadura del Guadalhorce). Existen, además, otras lagunas que se encuentran aún sin protección, como las de Caja y Viso, cerca de Antequera. Las Albuferas de Adra (Almería) están también protegidas como Reserva Natural. Estas figuras de protección no están contempladas en la Ley estatal 4/89 de *Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres*, sino que son regímenes de protección creados por la Ley autonómica 2/89 por la que se aprueba el *Inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía* y se establecen medidas adicionales para su protección. Así, las Reservas Naturales son espacios naturales de superficie relativamente escasa (si se los compara con los Parques Naturales), cuya creación tiene como finalidad la protección de ecosistemas, comunidades o elementos biológicos que, por su singularidad, fragilidad y belleza

tienen una alta valoración ambiental (Plan de Medio Ambiente de Andalucía, 1995). En el ámbito de las Reservas Naturales se limita la explotación de recursos, excepto cuando se trata de actividades compatibles con los valores que merecen protección y no se altera la dinámica de los sistemas naturales de estos espacios. No pueden llevarse a cabo actividades cinegéticas ni piscícolas, ni tampoco introducir o adaptar especies no autóctonas de flora y fauna; generalmente esta figura coincide con zonas húmedas.

La política de humedales ha evolucionado desde una concepción que promovía la destrucción. Así, hasta bien entrado el siglo XX, los humedales intactos eran lugares considerados nocivos, insalubres y peligrosos, y se procedía en muchos casos a su desecación como medida de salud pública y/o para incrementar la superficie agrícola, caso de la gran laguna de la Janda, en Cádiz, la mayor de Andalucía, con leyes, como la denominada "Ley Cambó", promotoras de estas acciones de eliminación, hasta una concepción de protección. El primer valor de los humedales que se reconoció fue el de la biodiversidad; en consecuencia, la protección se orientó hacia la gestión del humedal como reserva - isla de fauna y flora, mirando sólo hacia el interior. Hoy en día ningún espacio protegido puede gestionarse correctamente así, ya que es evidente que la interrelación con los factores ambientales externos es fundamental. En España hemos sido testigos de esta incorrecta gestión; en primer lugar, por la sobreexplotación de los acuíferos que descargaban en las zonas húmedas, como el caso de Tablas de Daimiel, que ha sido el más espectacular; y en segundo lugar, por la falta o descuido de una adecuada inspección y seguimiento de las actividades potencialmente contaminantes en las cuencas hidrográficas de estas regiones, como puso de manifiesto el accidente de Aznalcóllar. En este sentido es interesante comentar que la recuperación de este último espacio natural se enfoca precisamente desde una perspectiva más amplia, intentando proteger y regenerar desde la propia cuenca, con proyectos como los del Corredor Verde del Guadiamar.

Actualmente caben pocas dudas acerca de que probablemente el aspecto más importante en la gestión de humedales es el relativo al funcionamiento hidrológico - hidrogeológico de cada sistema, lo que exige conocer con el mayor detalle posible el papel que juegan en cada caso las aguas superficiales y subterráneas. Por otra parte, cada vez es más evidente que los humedales no sólo poseen un gran valor como "reducto" de biodiversidad, sino que también poseen otros valores y funciones, como ya se ha comentado en el epígrafe anterior.

La evolución en la planificación y gestión de humedales en España pasa por una primera fase, entre 1980-85, en la que España ratifica el Convenio de Ramsar (1982), por lo que quedan derogadas las políticas que incentivaban la desecación de humedales (la legislación vigente desde 1918 atribuía la propiedad de la tierra a quien convirtiera una marisma en terreno agrícola). En 1985, la Ley de Aguas incluye la política de conservación de humedales en la planificación y gestión hidrológica. Así, los planes de cuenca deben identificar los humedales y, si tienen especial valor ecológico, debe transferirse su gestión a las autoridades de conservación; toda actividad que afecte significativamente a un humedal debe someterse a estudio de impacto ambiental, etc.

En 1986, la entrada de España en la Unión Europea tuvo como consecuencia la adhesión a la Directiva de Aves por lo que todos los lugares Ramsar pasaron a ser considerados ZEPAs (Zonas de Especial Protección para las Aves), a los que se aplica el Derecho europeo además del nacional. La ley estatal 4/89 de *Espacios Naturales*

Protegidos y Flora y Fauna Silvestres incluye los humedales entre los hábitats a proteger. Esta ley sirve de marco para una abundante legislación posterior (1990-95) de las Comunidades Autónomas que concibe al humedal como una zona de especial protección, principalmente por su valor como reserva de biodiversidad. En el caso de las lagunas de este estudio se trata de la mencionada ley autonómica 2/89. Sin embargo, la política integral no está definitivamente instaurada, de lo que es buena prueba, por ejemplo, que los funcionarios responsables de la aplicación de la Ley de Aguas no siempre actúan coordinadamente con los gestores de los humedales.

El funcionamiento hidrológico de los humedales sigue sin ser considerado - salvo excepciones - desde la perspectiva de la planificación global del territorio. Aún prevalece una gestión artificial - hidráulica de los ríos. Otros usos, como el agrícola, contribuyen a la alteración de la estructura del suelo del humedal, y todavía es prioritaria la utilización del recurso para esos usos, con lo que se altera el caudal ecológico natural o la calidad de las aguas. Por ello, en 1998 se planteó la necesidad de integrar la política del agua y del territorio con la gestión de los humedales (Alonso García, 1999). En este sentido se han puesto en marcha varios proyectos, planes y estrategias para conseguir esta integración: la Estrategia Española para la Biodiversidad, el Plan Estratégico de Humedales, la Estrategia Forestal Española, etc. El documento clave para la consecución de este objetivo es, sin duda, el controvertido Libro Blanco del Agua en España (MMA, 2000), que sometió a debate público los diferentes aspectos de la gestión de recursos hídricos. En dicho documento se proponen mecanismos para inventariar, evaluar y asegurar el flujo a los principales ecosistemas, controlar la contaminación e integrar los humedales en los sistemas de control de riesgos. El cambio que se intenta realizar implica el que los humedales dejen de gestionarse como "reductos" de biodiversidad y se integren, como ya se ha comentado, en la política de gestión integral del agua. De hecho ya se está aplicando esta nueva concepción en proyectos a corto plazo, como los de Doñana 2005 (que intentará restaurar el flujo histórico de aguas hacia el Parque Nacional), la regeneración de la Bahía de Santander y sus humedales, o el plan integral para la albufera de Valencia.

Es evidente que, para que la consecución de todos estos proyectos tenga éxito, es necesaria la investigación científica de los principales factores que rigen el funcionamiento de estos sistemas y uno de los más importantes es, sin duda, el papel de las aguas superficiales y subterráneas.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Lagunas de Fuente de Piedra, Campillos y Archidona. (Norte de la provincia de Málaga).

Los primeros trabajos rigurosos que se realizan en la laguna de Fuente de Piedra tratan de la caracterización química del agua, de los aspectos morfológicos, y de la cuantificación de la cantidad de sal máxima que se podía extraer anualmente de la explotación en la laguna; estos trabajos datan de finales del siglo XIX (Calderón, 1888). Posteriormente se publicó un trabajo sobre la composición química del agua de la laguna (Casares, 1932). Las zonas endorreicas españolas, y el caso concreto de una de las lagunas incluidas en este estudio, la laguna de la Ratosa, fueron estudiadas en tres trabajos durante la primera mitad del siglo XX (Dantín, 1940 y 1944). Este periodo concluye con la publicación del "Catálogo de los lagos de España" (Pardo, 1948).

Los trabajos más relevantes publicados acerca de las zonas húmedas del norte de la provincia de Málaga desde tratan de aspectos muy diversos: Ornitología, Ecología, Geología e Hidrogeología. En el primer caso, son varios los autores que estudian la avifauna de la laguna de Fuente de Piedra: Bernis y Valverde (1954), Leveque (1960), Ferrer *et al.* (1976), Vargas *et al.* (1983), etc. Se trata de trabajos centrados sobre todo en el Flamenco Rosa (*Phoenicopterus ruber roseus*), entre los que merece ser destacada la Tesis Doctoral de Rendón (1996) "La laguna de Fuente de Piedra en la dinámica de la población de flamencos del Mediterráneo Occidental".

Entre las investigaciones de contenido ecológico, García Jiménez (1991) realizó en su Tesis Doctoral un estudio taxonómico del plancton de la laguna de Fuente de Piedra en el que, además, aportó datos hidroquímicos. De la Rosa (1992) estudió el fitoplancton de algunas lagunas de las provincias de Granada y Málaga, entre las que se incluyen las Lagunas Grande y Chica de Archidona y, por último, Gómez Nieto (1994) realizó un estudio comparativo de indicadores de contaminación fecal aislados en los sistemas lagunares de Antequera.

Las publicaciones relativas a diversas cuestiones geológicas del Norte de la provincia de Málaga se refieren a la Mineralogía de los sedimentos de la laguna de Fuente de Piedra (Castellón, 1970), a la Geología regional (Peyre, 1974; Cruz-Sanjulián, 1974) y a la Geomorfología (Pezzi, 1977; Lhénaff, 1981). Las hojas del Mapa Geológico Nacional a escala 1 : 50 000 (MAGNA), publicadas por el IGME que cubren el sector en cuestión son las de Antequera (Martín Serrano, 1986 a), Benamejí (Martín Serrano, 1986 b), Campillos (Baena *et al.*, 1986), Osuna (Cruz-Sanjulián y Divar Rodríguez, 1986), Teba (Cruz-Sanjulián, 1990) y Archidona (Pineda, 1991).

Los estudios hidrogeológicos de cierto detalle se iniciaron en 1974; el IGME realizó para el Plan Nacional de Aguas Subterráneas un inventario de captaciones de la zona. El ICONA realizó posteriormente un estudio para recargar la laguna bombeando agua subterránea (Cabanas, 1977). A partir de este momento se publican las tres Tesis Doctorales que sirven como punto de partida, en lo que respecta a la Hidrogeología, para la elaboración de este estudio. En la Tesis Doctoral "Contribución al conocimiento de la cuenca alta del río Guadalhorce: el medio físico, hidrogeoquímica" (Carrasco, 1986), se aporta una gran cantidad de información en relación a la hidroquímica de aguas subterráneas de la zona. Más adelante Linares (1991), realizó un estudio hidrogeológico completo de la cuenca de la laguna de Fuente de Piedra, entre otros aspectos incluye el balance hídrico de la cuenca, de la laguna y del acuífero, y propone alternativas para incrementar los recursos hídricos disponibles en la laguna, etc. Almécija (1997) realizó un estudio hidrológico e hidroquímico comparado de las lagunas de Campillos, Fuente de Piedra, Archidona y la Ratosa. Estos trabajos fueron sintetizados por el IGME (1998) en el texto "Hidrogeología de la laguna de Fuente de Piedra, (Málaga)", en donde se plasma la labor llevada a cabo sobre el tema desde 1974, como contribución a la protección del medio hídrico de la laguna.

Se han publicado otros trabajos que, parcial o específicamente, tratan acerca de la hidrogeología de las zonas húmedas en esta región, como los de Carrasco *et al.* (1993); Benavente *et al.* (1994) y Cruz-Sanjulián y Benavente (1996). En el Atlas Hidrogeológico de Andalucía, publicado conjuntamente por el IGME (ITGE en la fecha de publicación) y la Junta de Andalucía (1998), se hace referencia, de forma general, a

la Hidrogeología de la cuenca endorreica del norte de la provincia de Málaga, en un capítulo dedicado a la Hidrogeología de los espacios naturales protegidos.

Por último, recientemente la dirección General de Conservación de la Naturaleza del Ministerio de Medio Ambiente ha editado en Internet un completo estudio (http://www.mma.es/docs/conservnat/naturalia/naturalia_hispanica/MedHum/) sobre la laguna de Fuente de Piedra, como ejemplo de gestión de complejos endorreicos y esteparios (Ramírez González *et al.*, 1998).

1.2.2. Albuferas de Adra y desembocadura del Guadalhorce

Diversos autores han estudiado las albuferas desde el punto de vista ecológico, y entre tales trabajos destacan los de Margalef-Mir (1981), Sánchez-Castillo (1984 y 1987) y Alonso (1985), relativos a los macrófitos, al fitoplancton y a los cladóceros de las albuferas, respectivamente. Recientemente Fabián (2002) presentó su Tesis Doctoral acerca de la diversidad, composición y estructura de tamaños del plancton en ambas albuferas aplicando técnicas de citometría de flujo.

Las características químicas del agua de las albuferas han sido estudiadas en varios trabajos: IGME (1977, 1980), López (1983), Del Río (1986) y Carrillo *et al.* (1996), etc. Este último puso de manifiesto una tendencia a la eutrofización de las aguas, sobre todo en la albufera Honda.

La Hidrogeología de las albuferas ha sido estudiada por el IGME, desde 1970, en diversos proyectos de evaluación de los recursos hídricos, tanto de la Cuenca Sur (IGME, 1975, 1981), como de la provincia de Almería (IGME, 1977) y del acuífero del delta del río Adra (IGME, 1982). También, como en el epígrafe anterior, en el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (1998)

Carrasco *et al.* (1981) realizaron un estudio sobre la alimentación de las fuentes de Marbella, surgencias que constituyen uno de los principales aportes al río Adra. Por su parte, Pulido (1986, 1988) elaboró sendas síntesis hidrogeológicas, tanto de la cuenca del río Adra como del delta del mismo. García-López (1996), en un estudio sobre las sierras carbonatadas alpujárrides al sudeste de Sierra Nevada incluyó un apartado sobre el delta del río Adra. El Amrani-Paaza publicó diversos trabajos sobre la Hidrogeología e Hidroquímica del acuífero del delta del río Adra y presentó su Tesis Doctoral (El Amrani-Paaza, 1997) sobre la caracterización y la modelización hidrogeoquímicas de dicho acuífero.

Por último, el IEA (Instituto de Estudios Almerienses) publicó el "Estudio Integral de las Albuferas de Adra" (Martínez-Vidal y Castro, 1990) en el que, entre otros aspectos, se identifican los impactos de diversa índole que afectan a las albuferas.

La bibliografía más relevante relativa a la hidrogeología, ecología, y calidad ambiental del curso bajo del río Guadalhorce se resume a continuación: Garrido (1991) en las Jornadas de zonas húmedas andaluzas revisa los valores ambientales de la desembocadura del Guadalhorce e indica propuestas para su gestión. La Dirección General de Obras Hidráulicas MOPTMA (1995) publica el estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de adecuación del tramo bajo del río Guadalhorce, en el que se incluyen mapas de vegetación del complejo lagunar, así como inventarios de flora y

fauna. Este mismo año SURGE S.L. y OMICRON S.A. realizan un Informe complementario a este estudio de Impacto. Recientemente Carrasco *et al.* (2000) realizan un estudio (inédito) de supervisión de las actuaciones realizadas en el anteriormente mencionado Proyecto de adecuación. En 1998 el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga publican un estudio hidrogeológico del Bajo Guadalhorce para la captación de agua salobre para la desaladora de Málaga.

1.3. Descripción de los humedales estudiados

1.3.1. Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra

Situada al noroeste de la provincia de Málaga, a unos 70 km de la capital y a escasa distancia del límite con la provincia de Sevilla, es la laguna más grande de Andalucía y junto con la de Gallocanta (Zaragoza) son las dos lagunas mayores del país (figura 1.1). Su extensión es de 1219 ha y el área de su cuenca de recepción supera las

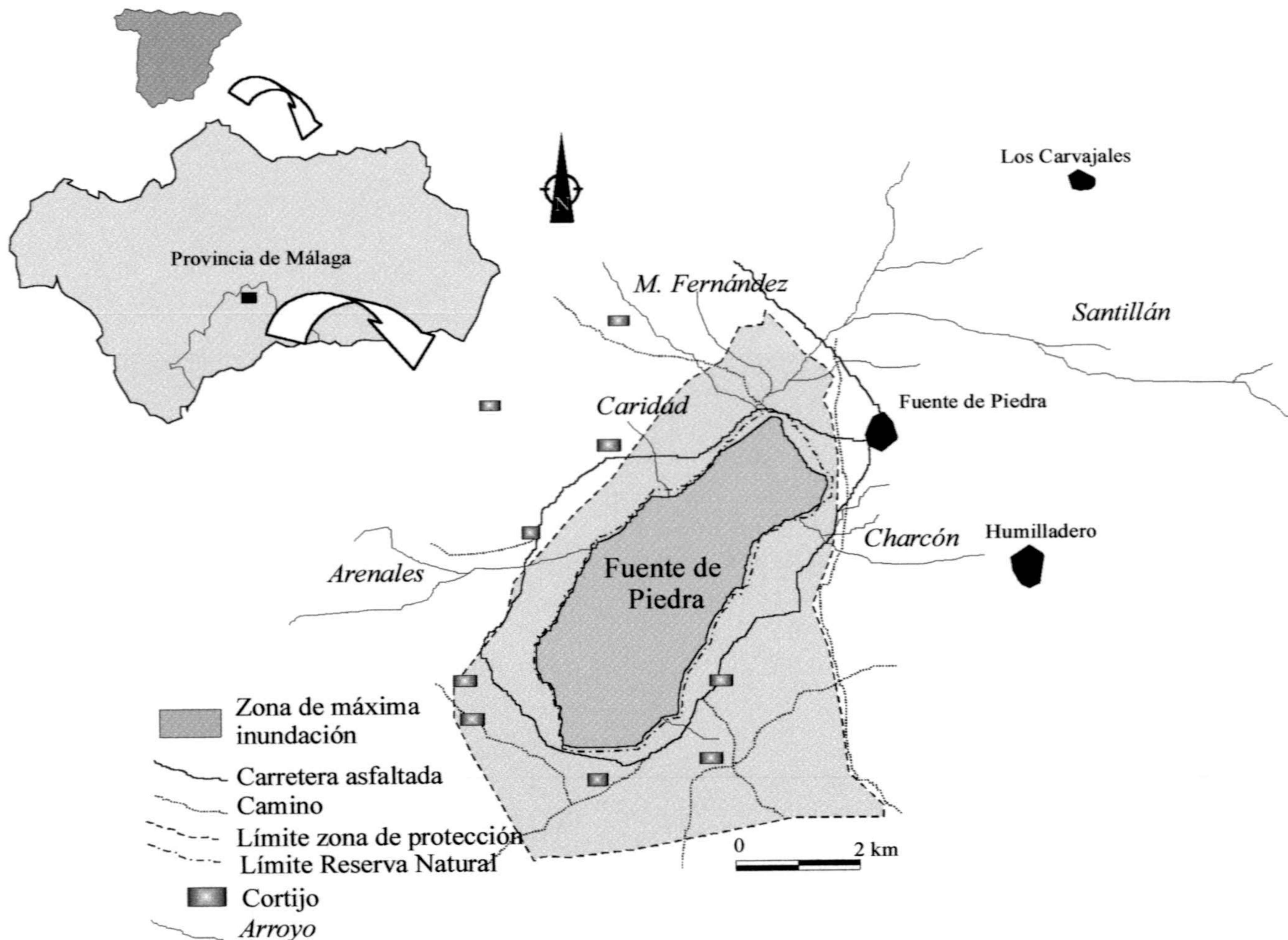


Figura 1.1. Croquis de la Reserva Natural "Laguna de Fuente de Piedra"

15000 ha. Como la mayoría de las lagunas de Málaga incluidas en el estudio, es endorreica. Se encuentra situada en la denominada Hoya del Navazo, en el término municipal de Fuente de Piedra, a 410 m de altura, 37° 7' N de latitud y 4° 45' W de longitud.

Es la única laguna de las estudiadas en la que hay afluentes bien definidos,

aunque no permanentes. Los dos mayores son los arroyos de Santillán y Charcón; sus aguas están contaminadas con residuos líquidos urbanos e industriales, aguas residuales y almazaras, respectivamente, de los dos principales núcleos de la cuenca, Humilladero y Fuente de Piedra; si bien el vertido de alpechín está prohibido desde 1983, se sigue realizando de forma esporádica. El arroyo Santillán tiene su origen en un manantial situado a unos 3.5 km al noroeste del pueblo de Mollina (ver figura 2.2.), que se origina en el contacto de los materiales carbonatados de la Sierra de Mollina - La Camorra con los del relleno mioceno - cuaternario de la depresión de Fuente de Piedra; tiene unos 7 km de longitud y dos afluentes: los arroyos de "la Serafina" y "del Pueblo"; desemboca en el borde norte de la laguna. El arroyo Charcón sigue en importancia al de Santillán y desemboca en el extremo nordeste de la laguna; tiene su origen en Humilladero y su longitud es de unos 4 km. Otros tres arroyos de menor importancia, el de Los Arenales, Mari Fernández y Caridad desembocan en el borde oeste de la laguna; el recorrido de los dos primeros supera los 5 km y el del último es de aproximadamente 2 km.

La escorrentía que aportan estos cauces, discontinua en el tiempo, está interceptada por un canal perimetral que servía tanto para regular la cantidad de agua embalsada (al explotarse como salinas hasta 1951, era necesario restringir las entradas de agua dulce a la laguna) como para que no se anegasen los cultivos cercanos. En la actualidad el problema no es tal, ya que la mayor parte del tiempo los cauces permanecen secos y, cuando aportan agua, gran parte es aprovechada para uso agrícola.

Además de la vegetación palustre, en la que abundan los carrizos, juncos y castañuelas, también existen tarays, pies de encina y sosas, plantas del género *salicornia*, especialmente adaptadas a medios con alta salinidad, entre otras muchas especies.

La importancia de la laguna de Fuente de Piedra, desde el punto de vista ornitológico radica, fundamentalmente, en que es un importante enclave de nidificación del flamenco rosa, de la pagaza piconegra y de la gaviota picofina, además de constituir un área básica de invernada y reposo de gran número de anátidas y limícolas. Esta laguna es la que tiene un mayor número de figuras de protección de las que se contemplan en este estudio: es propiedad pública (adquirida por el antiguo ICONA en 1981) y fue declarada en 1984 Reserva Integral (ley 1/1984, de 9 de enero); 5 años más tarde se modificó esta figura y pasó a ser Reserva Natural (ley 4/1989, de 27 de marzo); en 1983 fue incluida en la lista de Humedales de Importancia Internacional del Convenio de Ramsar y posteriormente se declaró ZEPA, de acuerdo con la Directiva 79/409/CEE (Bernués, 1990). En su perímetro se han perforado una serie de piezómetros de investigación y en el denominado "Cerro del Palo" hay instalada una estación meteorológica con pluviómetro, pluviógrafo, anemómetro, heliógrafo, y un tanque de evaporación "clase A".

1.3.2. Reserva Natural Laguna de la Ratosa

Se localiza entre los términos municipales de Humilladero y Alameda; sus coordenadas geográficas son: 37° 12' N de latitud y 4° 41' W de longitud; se encuentra, por tanto, al norte de la laguna de Fuente de Piedra. Su altitud es de 460 m. La zona de protección de esta Reserva ocupa una extensión de 145 ha (figura 1.2.).

Laguna de la Ratosa: Con un área de 22.7 ha, es una laguna somera cuya

profundidad media no supera los 1.6 m . La laguna, de carácter temporal y sin afluentes ni efluentes definidos, se encuentra rodeada por un olivar. La vegetación palustre es bastante reducida y está dominada por el carrizo y los juncos. Láridos, limícolas y anátidas representan su fauna más común; pueden observarse, además, flamencos, patos cuchara, cigüeñuelas, avocetas, etc. La única instalación disponible para la investigación consiste en un piezómetro instalado en el borde sudoeste de la laguna.

Laguna de la Herriza de los Ladrones: También denominada del Castañal, es una laguna de reducidas dimensiones, separada del extremo norte de la laguna de la Ratosa por una estrecha franja de terreno sembrada de olivos. Se encuentra seca la mayor parte del año, aunque en los periodos de lluvias excepcionales se inunda, de modo que llega incluso a unirse con la laguna de la Ratosa.

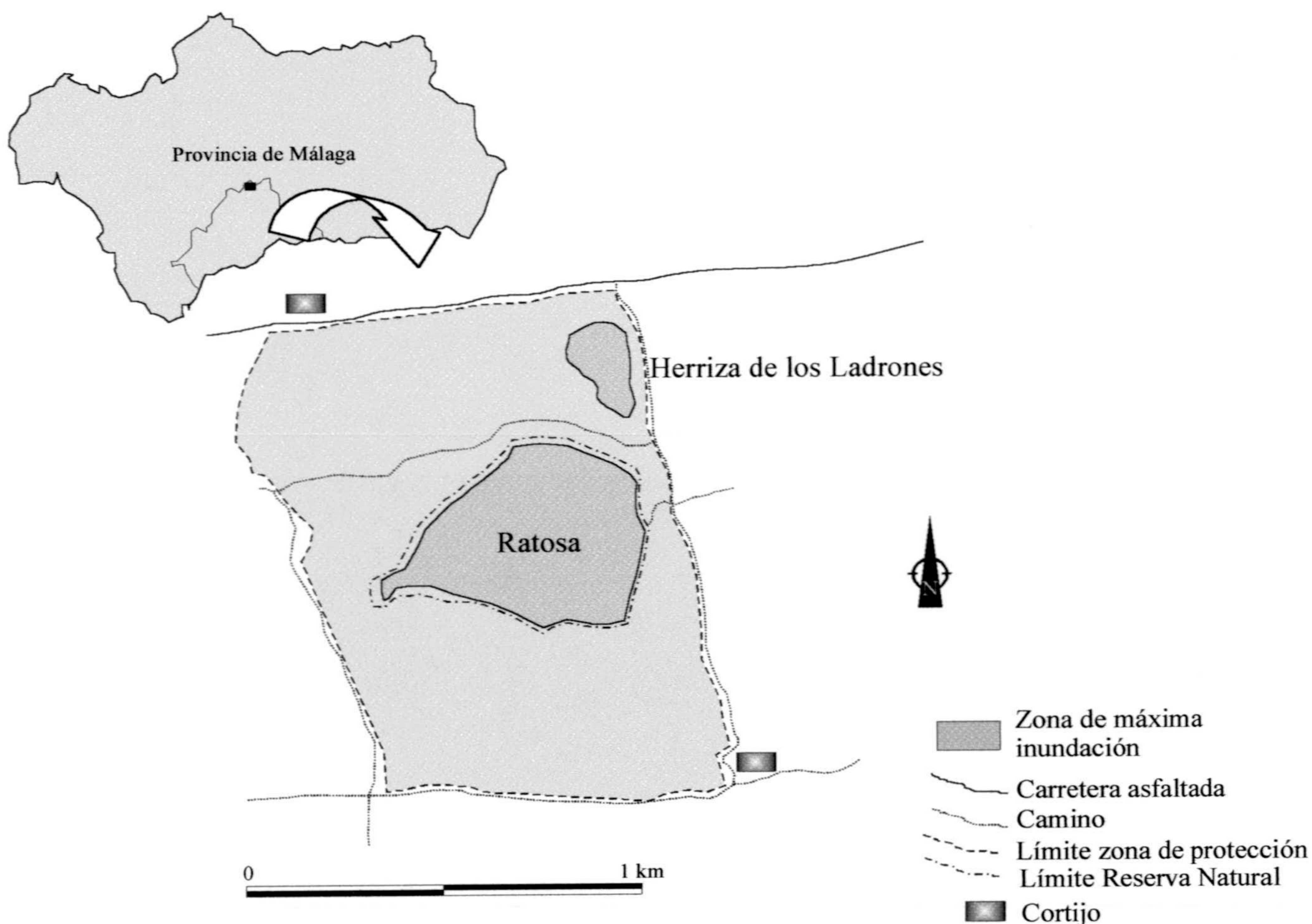


Figura 1.2. Croquis de la Reserva Natural "Laguna de la Ratosa"

1.3.3. Reserva Natural Lagunas de Campillos

Localizada en el término municipal de Campillos (figura 1.3.), la extensión de las zonas de Reserva es de 80 ha, repartidas entre las 5 lagunas protegidas; la zona de protección abarca 1046 ha. Se encuentra entre los 460 y 550 m sobre el nivel del mar. La vegetación palustre que crece en estas lagunas está formada básicamente por carrizos, juncos y castañuelas. Hay especies, como el taray, que aparecen tan sólo en algunas de las lagunas. De la avifauna acuática, las anátidas y limícolas son las aves más abundantes (tarro blanco, pato cuchara, chorlitejo patinegro). La mayoría de estas lagunas son utilizadas por los flamencos de Fuente de Piedra para alimentarse, por lo

que constituyen un enclave de vital importancia para el desarrollo de esta especie en la región. La totalidad de las lagunas que se encuentran en esta Reserva son temporales y normalmente se secan durante el verano.

Laguna Dulce: Situada en las coordenadas 37° 4' N de latitud y 4° 49' W de longitud, es la mayor de las lagunas de Campillos puesto que llega a alcanzar una

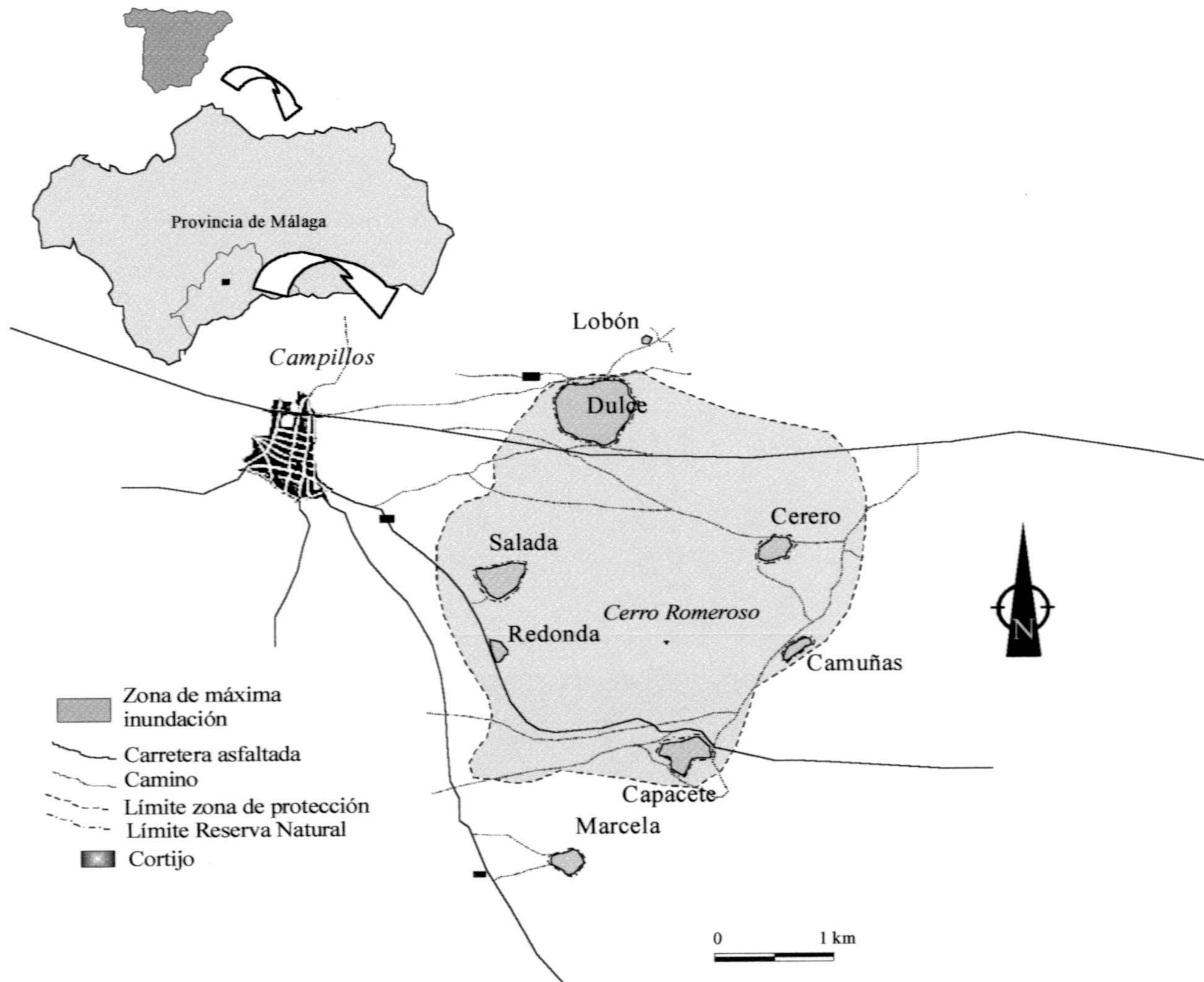


Figura 1.3. Croquis de la Reserva Natural "Lagunas de Campillos"

extensión de 78.5 ha en periodos lluviosos. Su profundidad media es de 1.3 m. Alrededor de la laguna se desarrollan comunidades vegetales fundamentalmente compuestas por juncos, aneas, carrizos y tarays. Los cultivos próximos son de olivos, cereal y girasol. Su cuenca hidrológica no es muy extensa, unas 100 ha, y no existe ningún afluente bien definido. Esta laguna ha sufrido una fuerte alteración antrópica con el objeto de ganar tierras para el cultivo; antiguamente su extensión era mayor y sus aguas menos saladas que en la actualidad (Rendón, *com. pers.*). En el entorno de esta laguna se han instalado cuatro piezómetros de investigación, cada uno de ellos situado en los bordes nordeste, noroeste, sudeste y sudoeste.

Laguna Salada: Con una extensión de 18 ha en periodos de máxima inundación, esta laguna tiene unas coordenadas de 37° 3' N de latitud y 4° 50' W de longitud. Se sitúa a 2 km al sur de la laguna Dulce y su profundidad media es también de 1.3 m. Su orla de vegetación litoral no es abundante, sólo se han descrito carrizos,

aunque en su parte norte aparece la especie halófila *Salicornia fruticosa*, indicadora de suelos fuertemente salinos, y en su parte sur crecen algunos tarays. Está totalmente rodeada por cultivos de secano. La escasa diversidad de especies vegetales en el entorno de esta laguna es debida a que, desde 1982, ha estado sometida a quemas para cultivar hasta el borde de la lámina de agua y, además, ha sufrido el vertido de una voluminosa orla de escombros en buena parte de su perímetro. La escorrentía no está canalizada y su cuenca vertiente no es muy extensa (72 ha). En la actualidad hay un piezómetro funcional instalado en el borde sudeste.

Laguna de Cerero: La laguna del Cerero, situada cerca del cortijo del mismo nombre, tiene 6.8 ha de superficie máxima inundable y una profundidad media de 2 m. Sus coordenadas geográficas son 37° 3' N de latitud y 4° 48' W de longitud. Es también una laguna bastante degradada por la actividad antrópica, con acumulación de escombros en las orillas. Las especies vegetales de orla se componen de carrizo y algunos tarays en su parte sur; es una comunidad pobre, seguramente debido a la citada acción antrópica. Su cuenca vertiente es pequeña, unas 7 ha, y está habitada por anátidas y limícolas como las anteriores, si bien la presencia del flamenco no es tan abundante. No existen en la actualidad piezómetros instalados en sus cercanías.

Laguna de Camuñas: La laguna de Camuñas tiene una superficie de inundación máxima de 2.5 ha. Está situada a menos de 1 km al S de la laguna de Cerero, y sus coordenadas son: 37° 2' N de latitud y 4° 48' W de longitud. Debido a la construcción de un canal de drenaje para la utilización del agua para riego, se encuentra muy degradada y la mayor parte del tiempo está seca. Su profundidad no sobrepasa el medio metro, ya que rebosa hacia el mencionado canal cuando el nivel alcanza los 44 cm. Se localiza en una de las zonas menos transformadas de la Reserva. La laguna está prácticamente cubierta de juncos y carrizos y no hay piezómetros cercanos a la cubeta.

Laguna de Capacete: Se encuentra situada cerca del cortijo que le da nombre y el área de máxima inundación alcanza las 13 ha. Sus coordenadas geográficas son 37° 2' N de latitud y 4° 49' W de longitud. Su profundidad media es de 1 m y recibe aportes del mencionado canal de drenaje: éste une ambas lagunas, y la laguna de Camuñas actúa de rebosadero, al estar situada a mayor cota. La laguna ha estado contaminada por los vertidos de purines de una granja de cerdos situada en el borde sur de la laguna, realizados hasta fechas recientes. Estos vertidos están prohibidos en la actualidad. La vegetación de orla se compone de carrizos, algunos halófilos y tarajes de porte arbóreo. En la laguna hay instalado un piezómetro de investigación, si bien no es muy profundo, y también un pozo, ambos en el borde sudeste.

Laguna de Lobón: Esta laguna se encuentra situada en las coordenadas 37° 4' N de latitud y 4° 49' W de longitud, lo que supone que no está incluida en la zona de protección de la Reserva Natural, aunque está a menos de 1 km de distancia de la laguna Dulce. Su superficie de inundación máxima es de 1.1 ha y su cuenca vertiente pequeña. Su profundidad media es de aproximadamente 1 m. Se encuentra también degradada por vertidos de escombros, pero la vegetación de orla es significativa y se compone de juncos y carrizos fundamentalmente. Posee la avifauna característica de anátidas y limícolas propia de estas lagunas. Un pequeño pozo de encuentra ubicado en la zona nordeste de la laguna.

Laguna de la Marcela: Situada en las coordenadas 37° 1' N de latitud y 4° 50'

W de longitud, esta laguna también se encuentra fuera de la zona de protección, a 1.5 km al sudeste de la laguna de Capacete. Con casi 4 ha de superficie de máxima inundación, está completamente rodeada por olivos y aislada de caminos y carreteras. Es quizá la laguna menos alterada del complejo, aunque no está protegida. La especie vegetal mayoritaria en su orla litoral son los juncos. Las anátidas y los limícolas son abundantes.

Laguna Redonda: Esta laguna tiene 1.37 ha de superficie de máxima inundación, aunque se encuentra la mayor parte del año seca, ya que está fuertemente alterada debido a los vertidos de escombros que afectan a toda la cubeta. Está situada muy próxima a la laguna Salada (se pueden considerar las mismas coordenadas para ambas) y, por tanto, se encuentra dentro de la zona de protección de la Reserva; sin embargo, la laguna como tal no está considerada como Reserva Natural. La vegetación de orla se compone de cardizales y los tarays crecen ocupando gran parte de la cubeta. En el año 2000 comenzaron a retirarse los escombros para restaurar la laguna; sin embargo, las obras no han concluido aún y el sistema no se encuentra completamente restaurado.

1.3.4. Reserva Natural Lagunas de Archidona

Se trata de una zona húmeda de carácter endorreico y origen kárstico, formada por las lagunas Grande y Chica (figura 1.4.), que son las más profundas de las que se incluyen en este estudio. La zona de protección de esta área protegida ocupa 187 ha y la zona de Reserva Natural 6.3 ha, repartidas entre las dos lagunas. Ninguna de las dos lagunas tiene afluentes ni efluentes definidos y sus cuencas vertientes son de reducidas dimensiones. La fauna acuática es abundante; las anátidas más representativas son el

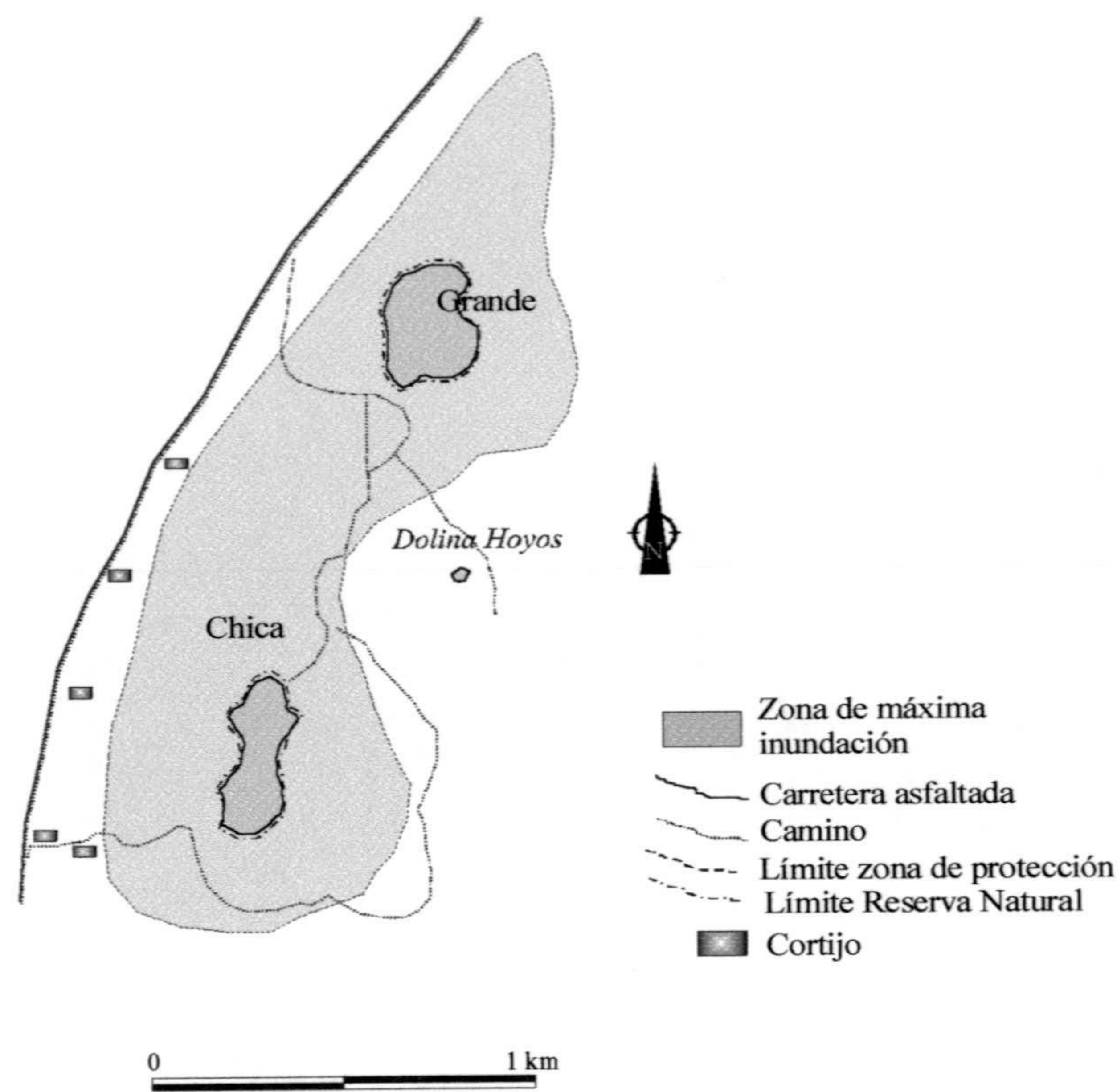


Figura 1.4. Croquis de la Reserva Natural "Lagunas de Archidona"

ánade real, la cerceta común y el zampullín cuellinegro. La vegetación palustre que crece en el cinturón perilagunar está formada básicamente por juncos, carrizos y cañas. La alteración antrópica es escasa, si bien en las cercanías hay una fábrica de yesos actualmente activa.

Laguna Grande: Situada en el término municipal de Archidona, en las coordenadas 37° 6' N de latitud y 4° 17' W de longitud, es la laguna más profunda de la provincia de Málaga y una de las más profundas de Andalucía: su profundidad máxima es de 13 m. Esta laguna está situada a 800 m de altitud. Tiene 9 ha de superficie de máxima inundación y es permanente. Los juncos y algunos tarays constituyen la vegetación de orla, que no es muy abundante. En los alrededores de la laguna abundan la retama y las encinas. También hay jara y tomillo como matorral predominante, típica vegetación del piso mesomediterráneo.

Laguna Chica: A 2 km al sudoeste de la laguna Grande se sitúa esta laguna de 8 ha de superficie máxima inundable y 8 m de profundidad; la altitud es, también, 800 m. Sus coordenadas son 37° 6' N de latitud y 4° 18' W de longitud. Esta laguna no es estrictamente permanente y llega a secarse completamente en los estiajes de los años secos, aunque sigue mostrando evidencias de humedad elevada en los sedimentos de su vaso. La vegetación de orla es más abundante que en la laguna Grande y, además de las especies mencionadas en la laguna anterior, hay cañas, que bordean casi toda la laguna.

Dolina Hoyos: Se trata de una pequeña dolina de hundimiento, de reducidas dimensiones, que almacena agua en su sumidero y que se ha tomado como representativa de las dolinas que abundan en la zona y que esporádicamente contienen agua.

1.3.5. Lagunas de Antequera

Se trata de dos lagunas temporales, de características similares y dimensiones

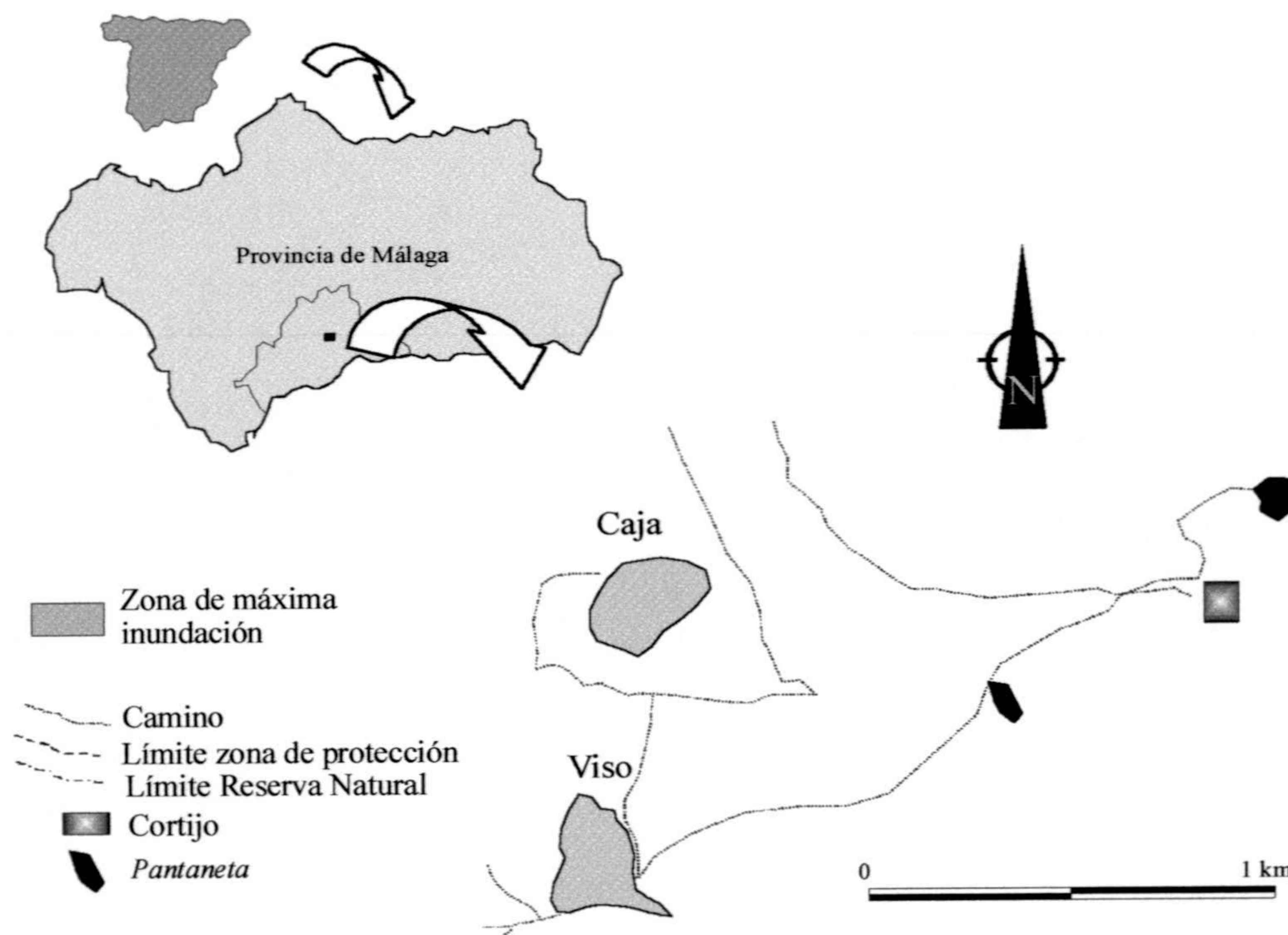


Figura 1.5. Croquis de las lagunas de Antequera, Caja y Viso

reducidas, muy cercanas y relativamente poco alteradas por la acción antrópica. Ambas son endorreicas y tienen origen kárstico (figura 1.5.). Rodeando a las lagunas por su flanco este, hay una extensa plantación de nogales.

Laguna de Caja: Situada en el término municipal de Antequera, esta laguna de 10 ha de superficie de máxima inundación, no está protegida como espacio natural. Sus coordenadas geográficas son 37° 1' N de latitud y 4° 28' W de longitud, y se encuentran a una cota de 720 m s.n.m. El cortijo más cercano es el cortijo Las Lomas. La profundidad media a la que se encuentra el fondo es de 1.5 m. No existe una orla de vegetación litoral, aunque sí existe vegetación acuática. Se encuentra rodeada por cultivos de cereal y en ella abunda la avifauna acuática, compuesta fundamentalmente por anátidas; también es frecuentada de forma esporádica por flamencos.

Laguna de Viso: Está situada también en el municipio de Antequera, en las coordenadas 37° 1' N de latitud y 4° 27' W de longitud; tampoco está protegida. Su superficie inundable es de 8 ha, y su profundidad media de 0.6 m. Esta laguna posee un cinturón de vegetación perilagunar pequeño, constituido básicamente por juncos. Está rodeada por cultivos de cereales y monte bajo, con encinas y matorral mediterráneo.

1.3.6. Paraje Natural Desembocadura del Guadalhorce

Situado a muy pocos kilómetros al sur de la ciudad de Málaga, sus coordenadas son: 36° 40' N de latitud y 4° 27' W de longitud; este Paraje Natural ocupa una superficie de 67 ha entre los dos brazos del río Guadalhorce, en la denominada Finca de la Isla (figura 1.6.). Fue declarado espacio natural protegido en 1989 y en los años 60 el



Figura 1.6. Croquis del Paraje Natural "Desembocadura del Guadalhorce"

área estaba cultivada en su totalidad. La finca La Isla limitaba el brazo oriental del río, con un área de marismas que se inundaban por la acción de los vientos de levante. Existían además, al este de dicho brazo, en la parte más occidental de la ciudad de Málaga, una serie de albuferas y pequeñas lagunas que se extendían por la playa. En los años 70, las zonas de cultivo se redujeron y casi todo el territorio se dedicó a la extracción de áridos, para su uso en la construcción. Las extracciones de arena se iniciaron en 1977 y se prolongaron hasta 1982. Durante esa época comenzaron a formarse pozas de distinto tamaño, que fueron inundándose progresivamente con la aportación subterránea de agua del río y del mar. En la actualidad se observan varias lagunas enclavadas entre ambos brazos del río; la vegetación se ha visto mermada a causa de las sucesivas alteraciones producidas, tanto en el Paraje como en sus inmediaciones, ya que no hay que olvidar que se trata de uno de los pocos espacios naturales protegidos, a nivel mundial, que se encuentran ubicados en los límites del casco urbano de una ciudad de más de medio millón de habitantes. Por su proximidad al estrecho de Gibraltar, es una zona de escala y descanso de aves migratorias costeras; así, se localizan numerosas aves tanto limícolas como acuáticas y ardeidas: garza real, zampullín chico, cormorán moñudo, gaviota de Audouin, etc. La vegetación aparece muy alterada a causa del manejo humano. Existen comunidades de tarays, de helófitos, (juncos y carrizos) y de halófitas (sosas). También hay especies no autóctonas como el eucaliptus y la caña de azúcar.

Laguna Grande: También denominada Laguna Mayor, por ser la más extensa, su orla de vegetación se compone fundamentalmente de juncos y sosas.

Laguna Eucaliptal: Sus características son muy similares a las de la anterior y ambas están muy próximas. En las dos lagunas hay instaladas escalas limnimétricas y en el paraje se han perforado una serie de piezómetros de investigación, pertenecientes al IGME.

1.3.7. Reserva Natural Albuferas de Adra

Se localizan en el extremo oriental de la llanura del delta del río Adra (cuyos depósitos constituyen un importante acuífero detrítico), en la provincia de Almería. Sus coordenadas geográficas son 36° 32' N de longitud y 2° 55' W de latitud. La superficie de la Reserva es de unas 60 ha, circunscrita prácticamente al contorno perimetral de las dos albuferas, cuya altitud está entre 0 y 1 m sobre el nivel del mar. Existe también una zona de protección de unas 150 ha, que comprende la franja situada entre la carretera N-340 y el mar Mediterráneo (figura 1.7.). Esta zona está cubierta casi totalmente por cultivos de regadío bajo plástico. Cada albufera está rodeada por una verja metálica para evitar, entre otras afecciones, el vertido de residuos agrícolas y de escombros o tierra, con objeto de implantar nuevos invernaderos, circunstancia que ha conducido en tiempos recientes a una drástica reducción en la orla de vegetación perilagunar, compuesta fundamentalmente por cañas y juncos.

Albufera Honda: Es la de menor tamaño (unas 7 ha); su profundidad media es de 1.5 m, y la máxima 3 m; está más alejada del mar que la albufera Nueva, a 750 m de la línea de costa. Desde el punto de vista hidrológico, está conectada con tres pequeñas ramblas, que drenan una cuenca de 17 km² de superficie; de esas ramblas, la de la Estanquera es la de mayor longitud. También recibe aguas derivadas del río Adra desde una acequia para regadío que desemboca en las albuferas, tanto en ésta como en la

Nueva.

Albufera Nueva: Se encuentra a 250 m de distancia de la línea de costa. Su extensión es de unas 24 ha, y su profundidad media es de 1.5 m (la máxima es de 3 m). Al margen de las aportaciones de la acequia mencionada en el epígrafe anterior, la

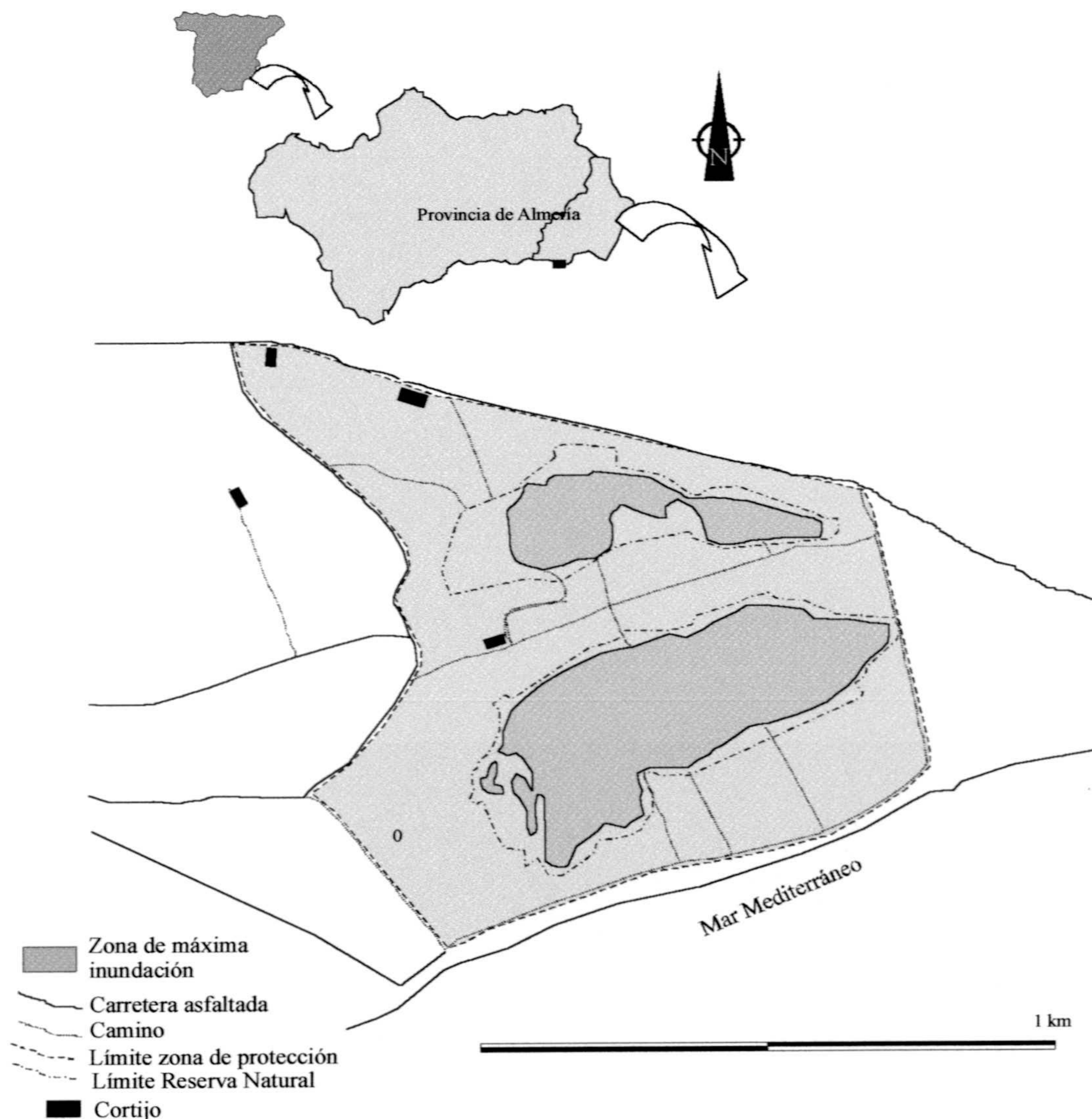


Figura 1.7. Croquis de la Reserva Natural "Albuferas de Adra"

albufera Nueva no recibe ningún otro aporte superficial pues no llega a ella cauce alguno.

1.4. Objetivos del estudio

1.4.1. Generales:

Teniendo en cuenta los valores ecológicos y económicos que presentan las zonas húmedas, el trabajo de investigación que se resume en esta Memoria de Tesis tiene dos objetivos generales:

1) En primer lugar, la caracterización hidrogeológica de algunas de las zonas húmedas del sudeste de España, concretamente todas las de la provincia de Málaga y las Albuferas de Adra, en Almería.

2) En segundo lugar, el estudio de aspectos limnológicos (que se detallarán en el siguiente epígrafe) y su relación con la hidrogeología de estos sistemas.

1.4.2. Parciales:

Por otra parte, como consecuencia de las especiales características que concurren en estos humedales, es muy importante y diversa la información científica que puede obtenerse del peculiar funcionamiento de estos sistemas, por ello, este estudio plantea otros objetivos específicos:

- Caracterización del ambiente físico y químico de los humedales más representativos de las provincias de Málaga y Almería, y de los factores que lo determinan.
- Clasificación hidroquímica de los humedales de estas dos provincias, con el propósito de determinar íntegramente sus características abióticas, en términos de rangos de variación de parámetros físico – químicos en un periodo suficientemente largo.
- Modelización de la recarga salina profunda a la Laguna de Fuente de Piedra, que es el humedal más representativo por su extensión e importancia ecológica, de los que se incluyen en este estudio.
- Estudio de la dinámica térmica de algunas de las lagunas incluidas en el estudio en términos de balances térmicos y evolución de la estabilidad.
- Contribución al conocimiento de las características geológicas de detalle del sector de las zonas húmedas de Campillos, labor que ha resultado muy necesaria para la comprensión de los sistemas correspondientes, porque la heterogeneidad litológica tiene, en este caso, una fuerte influencia en las características hidroquímicas y en la dinámica biológica de tales sistemas.
- Diagnóstico de la calidad ambiental de los humedales de las dos provincias en función de determinados parámetros físico – químicos.
- Desarrollo de un plan de vigilancia y control preliminar, con la convicción de que la información que aquí se presenta será útil para una adecuada planificación de la gestión ambiental de estos sistemas en el futuro.

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS VERTIENTES

2.1. Planteamiento del trabajo y metodología

En este capítulo se comentarán las características geográficas, climáticas, de vegetación y geológicas de las cuencas de las lagunas objeto de estudio. Se insistirá en este último aspecto; concretamente, en la geología de la Reserva Natural Lagunas de Campillos ya que. En este sector se ha considerado conveniente realizar una cartografía geológica de detalle por diversos motivos. En primer lugar, por el interés que deriva del hecho de existir, en un área de dimensiones reducidas (13 km²), 8 lagunas con características hidroquímicas diferentes, cuya interpretación hacía aconsejable disponer de una información geológica más detallada que la aportada por la hoja del Mapa Geológico Nacional (nº 1023: Antequera), de cuyos datos no se deducían con claridad las causas de tan marcada diversidad.

Este reconocimiento geológico detallado se ha visto facilitado por la posibilidad de observar cortes recientes proporcionados por los trabajos de construcción de la carretera de circunvalación de Campillos (A 357), tanto en el propio talud como en excavaciones cercanas realizadas con motivo de las obras y que actualmente ya han sido rellenadas de escombros. También se ha dispuesto de cortes recientes en la nueva línea de ferrocarril de Bobadilla a Campillos.

Otro enclave en el que se ha juzgado conveniente realizar un reconocimiento específico del entorno geológico ha sido en la Reserva Natural Albuferas de Adra, básicamente a partir de datos geofísicos, y como paso previo a la caracterización del funcionamiento hidrológico de este sistema..

Los mapas topográficos y geológicos existentes que se han utilizado han sido los siguientes:

Mapas topográficos a escala 1:50000 del Mapa Militar de España; editados por el Servicio Geográfico del Ejército: hoja 1022 (15-42): Campillos (tercera edición, 1990); y hoja 1023 (16-42): Antequera (primera edición, 1994). Mapas topográficos a escala 1: 10000 del Mapa Topográfico de Andalucía, que sirvieron como base al mapa geológico: hojas 1022 4-3; 1022 4-4; 1023 1-3; y 1023 1-4. El nuevo trazado de la A 357 se añadió a estos mapas topográficos. Se han utilizado, además, los mapas topográficos a escala 1: 10000 correspondientes al resto de las zonas estudiadas, desembocadura del Guadalhorce (1053 1-4), lagunas de Antequera (1024 1-4), lagunas de Archidona (1024 3-2), Ratosa (1006 2-4), laguna de Fuente de Piedra (1023 2-2, 2-1 y 1-2) y albuferas de Adra (1057 3-2 y 3-3).

Mapas geológicos a escala 1: 50000 del Mapa Geológico de España (serie segunda, primera edición), publicados por el ITGE: hoja 1022 (15-42): Campillos (Baena *et al.* 1986); hoja 1023 (16-42): Antequera (Martín Serrano, 1986 a); hoja 1024 (17-42): Archidona (Pineda, 1991); hoja 1005 (15-41): Osuna (Cruz - San Julián & Divar Rodríguez, 1986); hoja 1006 (16-41): Benamejí (Martín Serrano, 1986 b); hoja 1037 (15-43): Teba (Cruz - San Julián, 1990); hoja 1057 (21-44): Adra (Aldaya *et al.*, 1983).

Además, se analizaron dos series de fotografías aéreas del entorno de las lagunas de Campillos a escala aproximada 1:20000 utilizando estereoscopos de campo (aumentos X2 y X4). Estas series son:

- 1) 10 fotografías aéreas tomadas el 30 de mayo de 1990, a una altitud de 3680 m, por la empresa TRAGSA, con número de vuelo UAg 1052 153.26. Los números de registro son, respectivamente: 4643, 4647, 4651, 4894, 4898, 4902, 4906, 5024, 5028 y 5032. Estas fotos se realizaron tras un periodo de lluvias excepcional, a finales de 1989. Consecuentemente, las lagunas muestran un nivel de agua que se puede considerar como máximo.
- 2) 3 fotografías aéreas tomadas el 21 de septiembre de 1993, a una altitud de 3520 m, por la empresa CEFTA, con número de vuelo UAgI 6063 151.71. Los números de registro son, respectivamente: 0001, 0002 y 0003. Estas fotos se realizaron tras un periodo seco, al final del estiaje, y la mayoría de las lagunas estaban secas.

Para el resto de las lagunas se han analizado un total de 30 fotografías aéreas, del año 1990 y con el mismo número de vuelo (UAg 1052 153.26), que cubren la totalidad de los sistemas estudiados.

En relación con los trabajos de campo, se ha utilizado un equipo de sondeos manuales compuesto por 3 barras de sondeo y 6 de extensión, de 1 m de longitud y 22 mm de diámetro (marca Linnemann), y 1 martillo "Simplex" con cabeza de plástico, de 1 m de longitud (marca Stenzel).

Se realizaron 3 campañas de instalación de piezómetros de investigación durante el periodo de estudio (figura 2.1.), en los años 1996, 1998 y 1999 a cargo del Instituto del Agua. En ellas se realizaron 6 piezómetros en la zona de estudio: 4 en la laguna Dulce (NE, NW, SE y SW) y 2 en la laguna Salada, en su borde sur. Se han podido analizar los testigos de sondeos en 4 de ellos (Dulce SW, NE, NW y Salada S), con cuyos datos se han realizado los correspondientes perfiles. Por otra parte, durante estas campañas se perforaron 8 piezómetros en el perímetro de la laguna de Fuente de Piedra. Los piezómetros, de entre 10 y 20 m de profundidad, fueron realizados a rotación.

Como consecuencia de las a menudo deficientes condiciones de observación, la labor cartográfica ha requerido utilizar diversos criterios. En primer lugar, las características de las rocas (color, textura, estructuras, dureza, contenido en fósiles, contenido en carbonato cálcico con una solución al 10% de ácido clorhídrico, etc.) tanto en afloramientos como en fragmentos sueltos. En segundo lugar, se utilizaron criterios morfológicos (pendientes, etc.). En tercer lugar, características de los suelos, en particular el color. Finalmente, y allí donde ha sido necesario, se han tenido en cuenta criterios relativos a vegetación y usos del suelo.

Para el reconocimiento del entorno geológico de la Reserva Natural Albuferas de Adra se realizaron 3 sondeos eléctricos verticales (SEVs), mediante un equipo GEOTRON con dispositivo Schlumberger tetraelectródico simple y valores de AB/2 entre 60 y 100 m, y seis ensayos de penetración dinámica con un equipo ROLATEC ml-60-A, con puntaza de 40 mm de diámetro, ambos pertenecientes a la empresa GEYTEX,

S.L. También se realizaron una serie de 12 piezómetros someros (hasta 3 m) alrededor de las dos albuferas, con instalación de tubería ranurada de PVC de 40 mm de diámetro.

2.2. Rasgos geográficos

La laguna de Fuente de Piedra se encuentra situada al norte de la provincia de Málaga, a unos 75 km de la capital (figura 2.2.). La cuenca de la laguna es endorreica, de unos 150 km² de extensión, situada en la divisoria atlántico – mediterránea, es decir, en el límite de las cuencas hidrográficas del Guadalquivir y del Sur de España, aunque desde el punto de vista administrativo su gestión está asignada a la Confederación Hidrográfica del Sur.

Los puntos más elevados que la separan de las cuencas del río Guadalquivir y del Sur son las Sierras de Molina (800 m s.n.m.) al nordeste, y la Sierra de Humilladero (680 m s.n.m.), al este. Son los únicos relieves jurásicos carbonatados de importancia que se encuentran dentro de la cuenca, si bien, a menos de 5 km del límite nordeste de la cuenca, se encuentra la Sierra de Los Caballos (750 m s.n.m.).

La cuenca incluye parte de los términos municipales de Fuente de Piedra, Humilladero, Molina y Sierra de Yeguas, todos ellos pertenecientes a la provincia de Málaga, y parte del de la Roda de Andalucía, de la provincia de Sevilla. Los núcleos urbanos más importantes incluidos en la cuenca son Fuente de Piedra y Humilladero, con unos 5000 habitantes en conjunto (Linares, 1990). El código asignado en el I.L.H.E. (Inventario de Lagos y Humedales de España, D.G.O.H., 1995) a la laguna de Fuente de Piedra es 1023001, y sus coordenadas UTM son 30S UG 435095.

La laguna de la Ratososa (coordenadas UTM: 30S UG 491186) se encuentra situada a menos de 1 km del borde norte de la cuenca de la laguna de Fuente de Piedra, en los términos municipales de Humilladero y Alameda (figura 2.2.). La Herriza de los Ladrones (coordenadas UTM: 30S UG 494192) se encuentra en el municipio de Alameda. Los códigos I.L.H.E. de cada una de ellas son, respectivamente, 1006004 y 1006006. El relieve más cercano a ambas lagunas es la Sierra de La Camorra (680 m s.n.m.), macizo jurásico carbonatado que se encuentra inmediatamente al norte de la anteriormente mencionada Sierra de Molina.

Las ocho lagunas de Campillos se encuentran cerca del núcleo urbano del mismo nombre, que cuenta con una población de unos 8000 habitantes. Este sector no presenta relieves de envergadura, salvo los mencionados anteriormente, que quedan al norte. La localización UTM de las lagunas de Campillos y sus respectivos códigos del I.L.H.E. se encuentran en la Tabla 2.1.

HUMEDAL	CODIGO I.L.H.E.	UTM	MUNICIPIO	FIGURA DE PROTECCIÓN
Laguna Dulce	1023004	30S UG 369024	Campillos	Reserva Natural
Laguna Salada	1023005	30S UG 362007	Campillos	Reserva Natural
Laguna de Cerero	1023007	30S UG 387009	Campillos	Reserva Natural
Laguna de Camuñas	1023008	30S UG 389000	Campillos	Reserva Natural
Laguna de Capacete	1023009	30S UF 376991	Campillos	Reserva Natural
Laguna de Lobón	1023003	30S UG 380035	Campillos	
Laguna Redonda	1023006	30S UG 361000	Campillos	
Laguna de la Marcela	1023010	30S UF 362983	Campillos	

Tabla 2.1. Código I.L.H.E., coordenadas, municipio y figuras de protección de las lagunas de Campillos



Figura 2.1. Realización del piezómetro "Dulce SW" (UTM 30S UG 36380210), mayo 1999

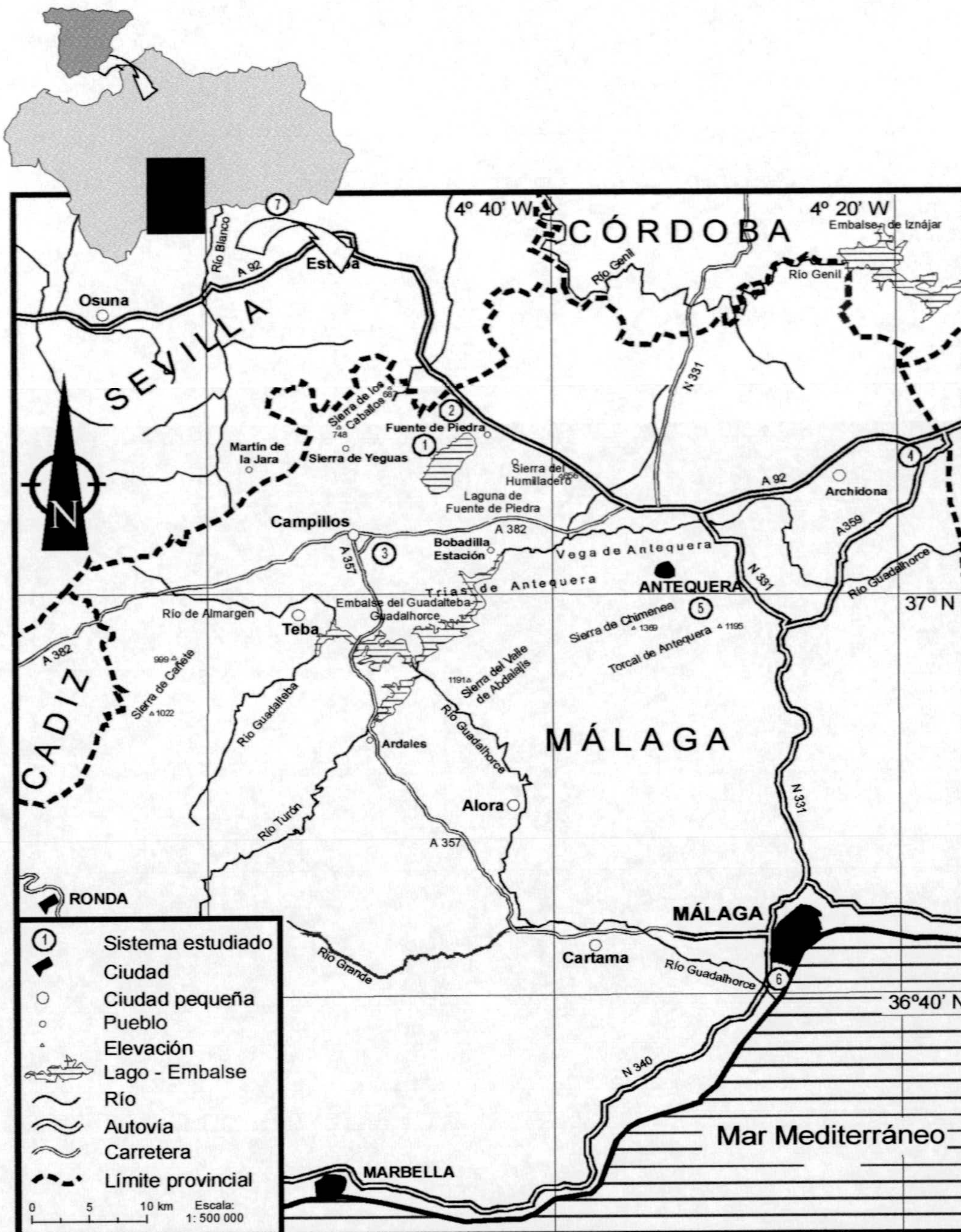


Figura 2.2. Localización geográfica de las zonas húmedas incluidas en este estudio. 1) R.N. Laguna de Fuente de Piedra; 2) R.N. Laguna de la Ratosa; 3) R.N. Lagunas de Campillos; 4) R.N. Lagunas de Archidona; 5) Lagunas de Antequera; 6) P.N. Desembocadura del Guadalquivir; 7) R.N. Albuferas de Adra (fuera del recuadro)

Las lagunas Grande (30S UG 843078) y Chica (30S UG 837067) están localizadas en el término municipal de Archidona, en el sector denominado Los Hoyos, en el límite con la provincia de Granada (figura 2.2.). Sus respectivos códigos I.L.H.E. son 1024004 y 1024013. El núcleo urbano más cercano es el pueblo de Salinas. La altura aproximada de este sector es de 800 m s.n.m, y su relieve es abrupto ya que las rocas que afloran en este sector están karstificadas, como se comentará en el apartado de Geomorfología.

Las lagunas de Caja (30S UF 693985) y Viso (30S UF 693795) no están sometidas a ningún régimen de protección, aunque están catalogadas en el I.L.H.E. (con los códigos 102417 y 102418). Se encuentran en el término municipal de Antequera (que es el núcleo de población más cercano), concretamente en el sector de la cuesta del Romeral, cercanas al cortijo Las Lomas. Estas lagunas también se encuentran en un enclave topográficamente elevado, como las de Archidona, en contraposición con las anteriormente comentadas (Fuente de Piedra, la Ratosa y Campillos), esteparias, ya que ocupan terrenos llanos y topográficamente deprimidos.

Las lagunas de la desembocadura del río Guadalhorce y las Albuferas de Adra (figura 2.2.) son los sistemas costeros incluidos en este estudio. En el primer caso, conviene indicar que se trata de lagunas artificiales (canteras de áridos abandonadas). Las lagunas de la desembocadura del río Guadalhorce se encuentran en el municipio de Málaga (tabla 2.2.), y en un sector (vega baja del Guadalhorce) donde se asientan numerosos polígonos industriales. En su entorno se localizan numerosas vías de

HUMEDAL	CODIGO I.L.H.E.	UTM	MUNICIPIO	FIGURA DE PROTECCIÓN
Desemb. Río Guadalhorce	1053001	30S UF 005595	Málaga	Paraje Natural
Albufera Honda	1057001	30S WF 045680	Adra	Reserva Natural. Ramsar
Albufera Nueva	1057002	30S WF 045675	Adra	Reserva Natural. Ramsar

Tabla 2.2. Código I.L.H.E., coordenadas, municipio y figuras de protección de las lagunas de la desembocadura del Guadalhorce y las albuferas de Adra

comunicación y el aeropuerto. En fechas recientes se ha finalizado, además, la adecuación del curso bajo del río Guadalhorce y algunas lagunas han sido alteradas (CHSE, 1994).

En el caso de las Albuferas de Adra, la población más próxima, Adra, contaba en 1994 con una población de casi 29000 habitantes, con un crecimiento anual del 5.5 % (El Amrani, 1997). Este crecimiento es debido a la rentabilidad de los cultivos bajo plásticos, rentabilidad que lleva asociada una degradación del medio que debe ser minimizada, sobre todo en el caso de espacios objeto de protección internacional, como son las Albuferas.

2.3. Clima

Zona norte de Málaga: Tomando como referencia los trabajos de Linares (1990) y Almécija (1997), el clima de la zona norte de la provincia de Málaga se clasifica como mediterráneo con tendencia semiárida. Los periodos de tiempo analizados para las distintas variables meteorológicas abarcan desde los 25 años; 1962/87 (Linares, 1990), a los 30 años; 1964/94 (Almécija, 1997).

Los módulos pluviométricos anuales de precipitación se encuentran entre los 400 mm/año (extremo occidental) y los 600 mm/año (extremo oriental). Esta diferencia

se debe, fundamentalmente, a que las principales elevaciones se encuentran en la zona este. El gradiente precipitación – altitud es de 50 mm/100 m (Almécija, 1997). La precipitación se concentra desde octubre hasta febrero; en estos 5 meses se produce el 90% de la precipitación total (Linares, 1990). El mes menos lluvioso es julio, con precipitación nula en muchas ocasiones. Las temperaturas medias anuales del área están comprendidas entre los 17 °C y los 15 °C; el mes más frío es enero (7 °C) y el más caluroso es agosto (21 °C).

La evaporación es una variable fundamental para la realización de balances hídricos; en esta región tiene un valor medio de 850 mm/año para la evapotranspiración potencial (ETP), aplicando el método de Thornthwaite. Los valores acumulados de los meses de junio a agosto representan prácticamente el 50% del total anual (Linares, 1990). La evapotranspiración real (ETR), estimada a partir de la ETP mediante balances de agua en el suelo, representa el 35% aproximadamente de la ETP, a causa de la aridez de este tipo de clima, lo que supone una media anual de 300 mm, es decir, aproximadamente 0.8 mm/día. Estos valores de ETP y ETR representan medias aproximadas para el área de estudio. Es evidente que la evaporación desde la lámina de agua libre de las lagunas será mayor, ya que la ETR se calcula para terrenos no inundados, generalmente agrícolas. El valor medio anual para la evaporación desde una lámina de agua libre, suponiendo que hay disponibilidad de agua durante todo el año, es de 1600 mm, medida con un evaporímetro tipo "Piché" en la estación de la Herriza (años 92 - 94), con valores de unos 10 mm/día de evaporación durante los meses de verano. Estos valores son del mismo orden de magnitud que los proporcionados por evaporímetros convencionales, de "clase A" (Almécija, 1997), o los calculados a partir de determinadas variables meteorológicas, con la fórmula de Penman. Se han estimado valores volumétricos de evaporación en la Laguna de Fuente de Piedra (ITGE, 1998) suponiendo que no se deseca en verano, con un valor de aproximadamente 1200 mm/año (año 1995/96).

Los vientos más frecuentes en el extremo occidental de la laguna de Fuente de Piedra son los de componente sur (Almécija 1997), y es en verano cuando alcanzan una mayor velocidad.

Desembocadura del Guadalhorce: el clima en el bajo Valle del Guadalhorce se clasifica como mediterráneo subtropical, con un rango de precipitaciones entre los 400 mm y los 900 mm. En la estación meteorológica considerada como representativa de esta zona, aeropuerto de Málaga (7 m s.n.m.), para un periodo de 30 años, la precipitación media es de 580 mm. Julio es el mes menos lluvioso, con una precipitación media de 1.5 mm. La temperatura media es de 18 °C, siendo el mes más frío enero (21.1 °C) y el mes más cálido agosto (25.3 °C). Los vientos predominantes son los terrales, que provienen del norte, son fríos en invierno y cálidos en verano, (CHSE, 1994).

Albuferas de Adra: Clima mediterráneo subtropical, según los datos de la estación meteorológica Faro de Adra (31 m s.n.m.). Para el periodo 1975 – 1995, la precipitación anual es de 400 mm, el mes de máxima precipitación es diciembre y el de mínima julio (El Amrani, 1997). La temperatura media anual en el delta del río Adra es de 18.4 °C (Morales, 1986); el mes más frío es enero (13.4 °C) y el más cálido agosto (21.5 °C). La ETP, estimada con la fórmula de Thornthwaite, es de 900 mm/año, y la ETR varía entre 230 y 320 mm/año en función del tipo de suelo que se considere.

2.4. Geología

2.4.1. Introducción: la Cordillera Bética

Todas las lagunas que se incluyen en este estudio se encuentran en el ámbito de la Cordillera Bética. Las lagunas interiores, en el Dominio Subbético Medio y las costeras sobre depósitos cuaternarios de tipo deltaico.

Atendiendo a criterios litológicos y estructurales, la Cordillera Bética (figura 2.3.) puede considerarse dividida en Zonas Internas y Zonas Externas.

Las Zonas Internas, situadas al sur-sudeste, están afectadas por metamorfismo de tipo alpino y estructuradas en cabalgamientos y mantos de corrimiento; se edad está comprendida entre el Precámbrico y el Terciario. Se dividen en tres unidades, el Nevado - Filábride, el Alpujarride y el Maláguide.

Las Zonas Externas están situadas al norte - noroeste, y en ellas están representados materiales mesozoicos y terciarios, no afectados por metamorfismo.

Además de estos dominios existe en la Cordillera Bética otro conjunto de materiales, representado por las unidades alóctonas constituidas mayoritariamente por secuencias flyschoides del tipo Campo de Gibraltar, que están situadas entre las dos Zonas mencionadas anteriormente. Algunos autores (Baena, *et al.*, 1982) denominan a este conjunto "materiales de la Zona Circumbética".

Las Zonas Externas se dividen en dos Dominios, el Prebético al norte y el Subbético al sur. A su vez, el Subbético se divide en Subbético Externo, al norte, Subbético Medio y Subbético Interno, al sur (tabla 2.3.). Los materiales sobre los que se sitúan las lagunas continentales estudiadas pertenecen al Subbético Medio, como ya se ha comentado, o bien son materiales detríticos postorogénicos, de edad Neógena y Cuaternaria, depositados en ambientes marinos o continentales.

Las principales características estratigráficas y sedimentológicas de los materiales pre y postorogénicos del área de estudio correspondiente al norte de la provincia de Málaga (figura 2.4.) se detallarán a continuación; de mayor a menor antigüedad son:

Materiales triásicos: Están constituidos, fundamentalmente, por un conjunto de arcillas y margas de colores abigarrados, de tonalidades verdes, burdeos y violetas, entre las que aparecen niveles de yeso como material más abundante, de areniscas rojas o grisáceas, y de manera local y englobados en este conjunto de materiales, dolomías y calizas, generalmente brechificados, en afloramientos de pequeño tamaño. También localmente aparecen materiales volcánicos, concretamente diabasas augíticas (ofitas). Estos materiales se han atribuido a dos conjuntos diferenciados por criterios tectónicos: el Trías de Antequera y el Trías Subbético. Debido a las similitudes litológicas que ambos materiales presentan, para la cartografía geológica se han considerado como un conjunto único denominado Trías Subbético Indiferenciado (ITGE, 1998), la discusión acerca del origen y procedencia de estos materiales no entra dentro de los objetivos de este trabajo.

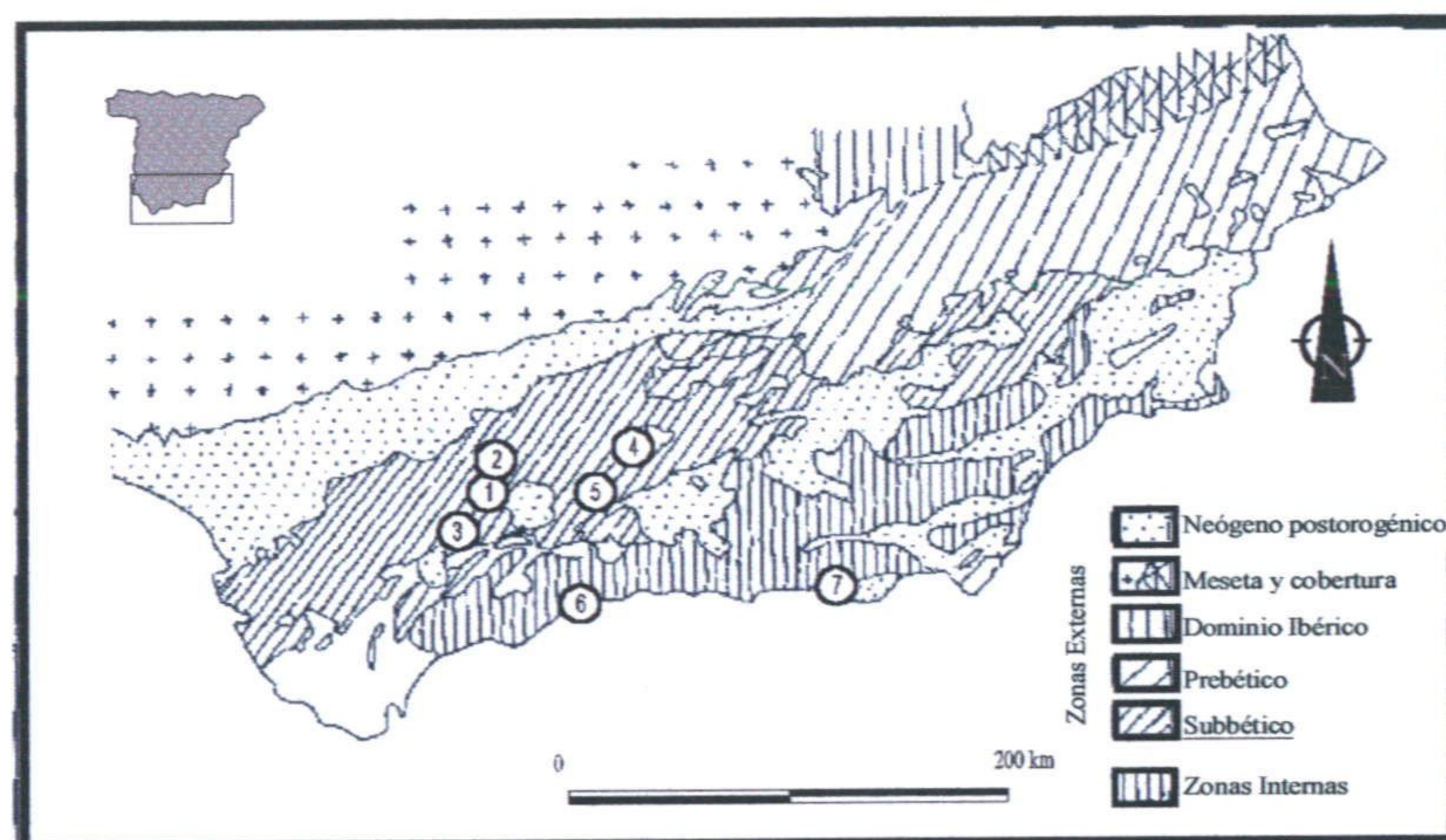


Figura 2.3. Localización de los sectores estudiados en el contexto de las Cordilleras Béticas (Foucault, 1974). 1) R.N. Laguna de Fuente de Piedra; 2) R.N. Laguna de Ratosa; 3) R.N. Lagunas de Campillos; 4) R.N. Lagunas de Archidona; 5) Lagunas de Antequera; 6) P.N. Desembocadura del Guadalhorce; 7) R.N. Albuferas de Adra

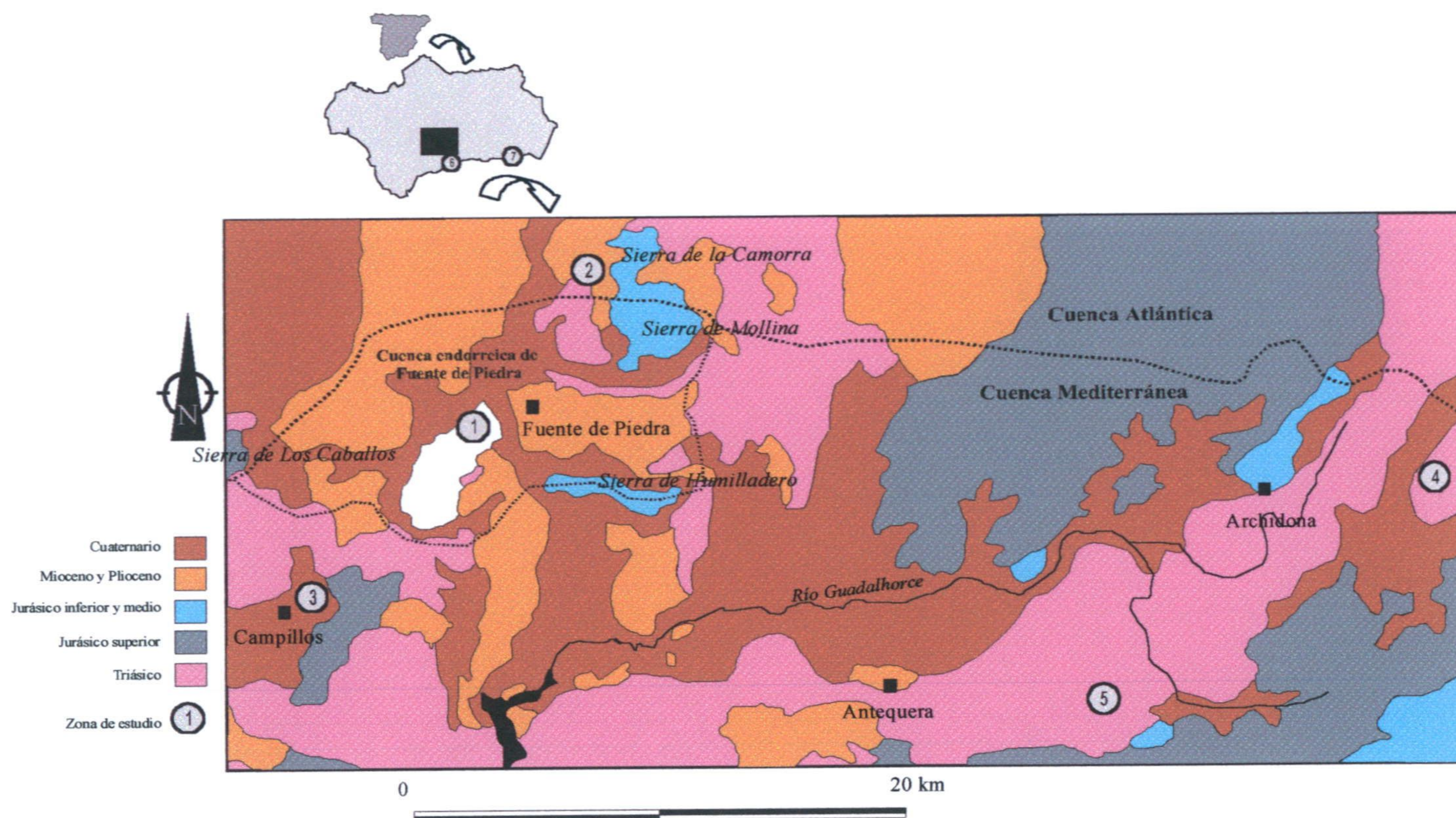


Figura 2.4. Esquema geológico de la zona norte de la provincia de Málaga. En punteado se han representado las divisorias atlántico - mediterránea y de la cuenca de la laguna de Fuente de Piedra

PERIODO	EPOCA	PISO	SUBBETICO INTERNO	SUBBETICO MEDIO	SUBBETICO EXTERNO	
Cuaternario			<i>Depósitos cuaternarios diversos</i>			
Neógeno	Plioceno		<i>Depósitos fluviales</i>			
	Superior	Messiniense	<i>Areniscas bioclásticas, margas calcáreas, calizas margosas, conglomerados, brechas.</i>			
		Tortonense				
	Medio	Serravaliense	(<i>Hiato</i>)	(Sedimentos tipo molasa, no aparecen en la hoja de Campillos)		
		Langhiense				
	Inferior	Burdigaliense	Formación Olistostrómica con flysch "Campo de Gibraltar"	Sedimentos Flysch: Margas turbidíticas, calizas margosas y areniscas	Sedimentos Flysch: Margas turbidíticas, calizas margosas y areniscas	
		Aquitaniense	Sedimentos Flysch: Margas turbidíticas, calizas margosas y areniscas			
	Paleógeno	Oligoceno		Margas pelágicas y calizas margosas con sílex. Potencia aprox.: 170m. "Capas rojas"	Margas pelágicas y calizas margosas con sílex. Potencia aprox. : más de 80 m. "Capas rojas"	Margas pelágicas y calizas margosas con sílex. Potencia aprox. : 250m. "Capas rojas"
		Eoceno	Superior			
			Medio			
Inferior						
Paleoceno						
Cretácico	Superior	Maastrichtiense	(Hiato)	"Capas rojas"	"Capas rojas"	
		Campaniense				
		Santoniense				
		Coniaciense				
		Turonense				
		Cenomaniense				
	Inferior	Albiense	(Hiato)	Calizas margosas, margas grises y margas arcillosas rojas o verdes Macro y microfauna diversa. Espesor: Subético Interno más de 50 m; Subbético Medio 200 m; Subbético Externo 400 m.		
		Aptiense				
		Barremiense				
		Hauteriviense				
		Valanginiense				
		Berriasiense				
Jurásico	Superior (Malm)	Tithoniense	Calizas brechoides nodulosas y micríticas.	Margas y calizas margosas con radiolarios. En el Dogger Inferior además, calizas brechificadas dolomitizadas.	Calizas nodulosas brechoides y calizas micríticas brechoides	
		Kimmeridgiense				
		Oxfordiense				
	Medio (Dogger)	Calloviense	Calizas micríticas oolíticas y pisolíticas	Margas con organismos bentónicos, conchas y bioturbación (potencia 200m).	Calizas micríticas oolíticas y pisolíticas con una potencia aproximado de 400 – 700 m.	
		Bathonense				
		Bajociense				
		Aalenense				
	Inferior (Lias)	Toarciense	Dolomías brechoides con una potencia aproximada de 300 m en el Subbético Medio.			
		Pliensbachiense				
		Sinemuriense				
Triásico	Keuper		Arcillas, areniscas, margas, yeso, halita.	Arcillas, areniscas, margas, yeso, halita	Arcillas, areniscas, margas, yeso, halita	
	Muschelkalk		Calizas y dolomías.			

Tabla 2.3. Formaciones Mesozoicas y Cenozoicas en el Subbético (según Cruz - San Julián, 1980, 1990; Baena et al., 1981 y Martín Serrano, 1986)

Formaciones del Jurásico y Cretácico: En el interior de la zona de protección de los Espacios Naturales Protegidos incluidos en este estudio no afloran materiales de este tipo, ya que normalmente forman pequeñas sierras cuyos materiales, fundamentalmente carbonatados, están karstificados y presentan altas tasas de infiltración, lo cual dificulta lógicamente la formación sobre ellas de lagunas del tipo de las aquí estudiadas. Sin embargo, influyen en el funcionamiento hidrológico de algunas de ellas, como la laguna de Fuente de Piedra, ya que pueden constituir zonas de recarga de su acuífero: la Sierra de los Caballos, la de Humilladero y la de Molina, pertenecientes al Dominio Subbético Medio, flanquean el acuífero de Fuente de Piedra (figura 2.4.); Linares (1990) hace una descripción somera de las series que constituyen estas Sierras. Otras, situadas al sur y pertenecientes al Dominio Subbético Interno son las Sierras del Torcal y Teba. El Cretácico está constituido fundamentalmente por una potente formación de margas y margocalizas (ITGE, 1998).

Materiales miocenos: Constituidos fundamentalmente por calcarenitas bioclásticas. Existen intercalaciones de margas, arenas y conglomerados que afloran ocasionalmente. Se pueden encontrar recubiertas de suelos rojos. Peyre (1974) atribuye una edad Tortonense Superior a estos materiales. La potencia es variable, por ser materiales postorogénicos que fosilizan un paleorrelieve, y está comprendida entre 30 y 100 m (ITGE, 1998).

Plio – Cuaternario: Aparecen en la parte oriental del área estudiada, en el sector de los Hoyos, y están constituidos por materiales detríticos continentales (Pineda, 1991).

Cuaternario: Se trata de depósitos de escasa potencia y de naturaleza detrítica: arcillas, arenas y gravas que, en ocasiones, se encuentran cementadas. Su origen es heterogéneo, si bien se puede hacer una clasificación en tres grupos principales: 1) materiales de depósito de vertientes que se asocian con cambios de pendiente en materiales paleógenos, miocenos o triásicos y que están constituidos por arenas y cantos de distinta naturaleza, de edad Pleistoceno Inferior; 2) Los depósitos aluviales que corresponden principalmente con el Pleistoceno Superior y Holoceno, y 3) depósitos residuales, de encharcamiento superficial y de fondo de laguna. Los primeros corresponden a suelos de descalcificación y presentan característicos tonos rojizos (edad Pleistoceno y Holoceno Inferior); los dos últimos suelen estar asociados a zonas mal drenadas en las inmediaciones de las lagunas, o en las lagunas mismas; se trata de materiales finos, con abundancia de materia orgánica y con proporción variable de sales.

2.4.2. Estratigrafía y estructura de las cuencas de las lagunas estudiadas y sectores adyacentes

En el entorno de la laguna de Fuente de Piedra predominan los afloramientos de tres tipos de cuaternarios: aluviales, como los asociados a los cauces de los arroyos Santillán, Charcón, Arenales, etc.; derrubios de ladera y, por último, materiales más recientes, de depósito de laguna, que están formados por lodos orgánicos, en ocasiones cubiertos por una película de sales. Les siguen en extensión los afloramientos de calcarenitas bioclásticas del Mioceno superior. En la parte meridional de la cuenca de la laguna, afloran arcillas y margas triásicas, y en la orilla oriental existe un pequeño afloramiento de dolomías y carniolas, también triásicas (figura 2.4.). Los materiales jurásicos afloran dentro de la cuenca de la laguna en las sierras de Molina y Humilladero, al nordeste y sudeste respectivamente.

La laguna de la Ratosa se encuentra en afloramientos de materiales cuaternarios de origen aluvial, si bien en sus bordes norte y oeste afloran las arcillas y margas del triás. La laguna de la Herriza de los Ladrones se asienta sobre estos materiales triásicos. Aproximadamente a 1 km al este de la Ratosa, el afloramiento jurásico de la Sierra de la Camorra corresponde a materiales de tipo carbonatado, calizas y dolomías fundamentalmente.

Las lagunas Grande y Chica de Archidona y las lagunas de Caja y Viso, aparecen directamente sobre materiales triásicos; en el primer caso los materiales más abundantes del sector son arcillas y yesos, y en el segundo caso arcillas y carniolas

Las lagunas de la desembocadura del Guadalhorce se sitúan sobre los depósitos cuaternarios de tipo aluvial del río, que están constituidos fundamentalmente por gravas, arenas, limos y arcillas con potencia entre 8 y 50 m (CHSE, 1994). Hay que señalar que, tanto este sistema como las Albuferas de Adra, no se encuentran sobre el Subbético, sino en depresiones terciarias independientes dentro del conjunto de las Cordilleras Béticas, y los materiales que las constituyen son, por tanto, terciarios postorogénicos. El sustrato de estas cuencas está constituido por materiales de unidades alpujárrides y maláguides, pertenecientes por tanto a las Zonas Internas de la Cordillera.

Las Albuferas de Adra se sitúan sobre los materiales del delta del río Adra. Estos materiales son cuaternarios, pliocenos y miocenos sobre un sustrato metapelítico del Complejo Alpujárride. Existen cambios de facies en los materiales mio - pliocenos: conglomerados, areniscas, margas, calcarenitas y calizas bioclásticas (Aldaya *et al.*, 1983). Entre los depósitos cuaternarios, se pueden distinguir los sedimentos aluviales de aquellos otros de granulometría más fina y colores negruzcos, correspondientes a facies de albufera o marisma, que forman el sustrato de los vasos de las albuferas.

2.4.3. Estudios geológicos específicos

Como se indicó en el apartado 2.1., se ha realizado la cartografía geológica de detalle de la Reserva Natural Lagunas de Campillos, cuyos resultados están representados en la figura 2.11. (cartografía geológica) y en la figura 2.12. (mapa complementario). Por otra parte, a partir de datos geofísicos se ha realizado un estudio del entorno geológico de la Reserva Natural Albuferas de Adra.

2.4.3.1. Reserva Natural Lagunas de Campillos

En este apartado se comentarán las características estratigráficas de las formaciones cartografiadas. La descripción de estas formaciones se hará de forma que sea coherente con la Leyenda del Mapa Geológico de la Reserva Natural Lagunas de Campillos (figura 2.11). La descripción de los principales cortes, sondeos y de los perfiles de C.E. del agua en pozos y piezómetros se ha incluido en el Anexo I.

Formaciones Preorogénicas y Sinorogénicas:

Rocas triásicas (Formaciones 1, 2 y 3): La secuencia triásica de la Reserva Natural Lagunas de Campillos incluye una gran diversidad de tipos litológicos. La datación de las rocas carbonatadas es difícil debido a que no contienen fósiles



Figura 2.5. Cerro del Romeroso visto desde el este y laguna de Camuñas. El punto de referencia "RP" (30S UG 38660021) señala el color rosa característico de los suelos desarrollados sobre materiales triásicos

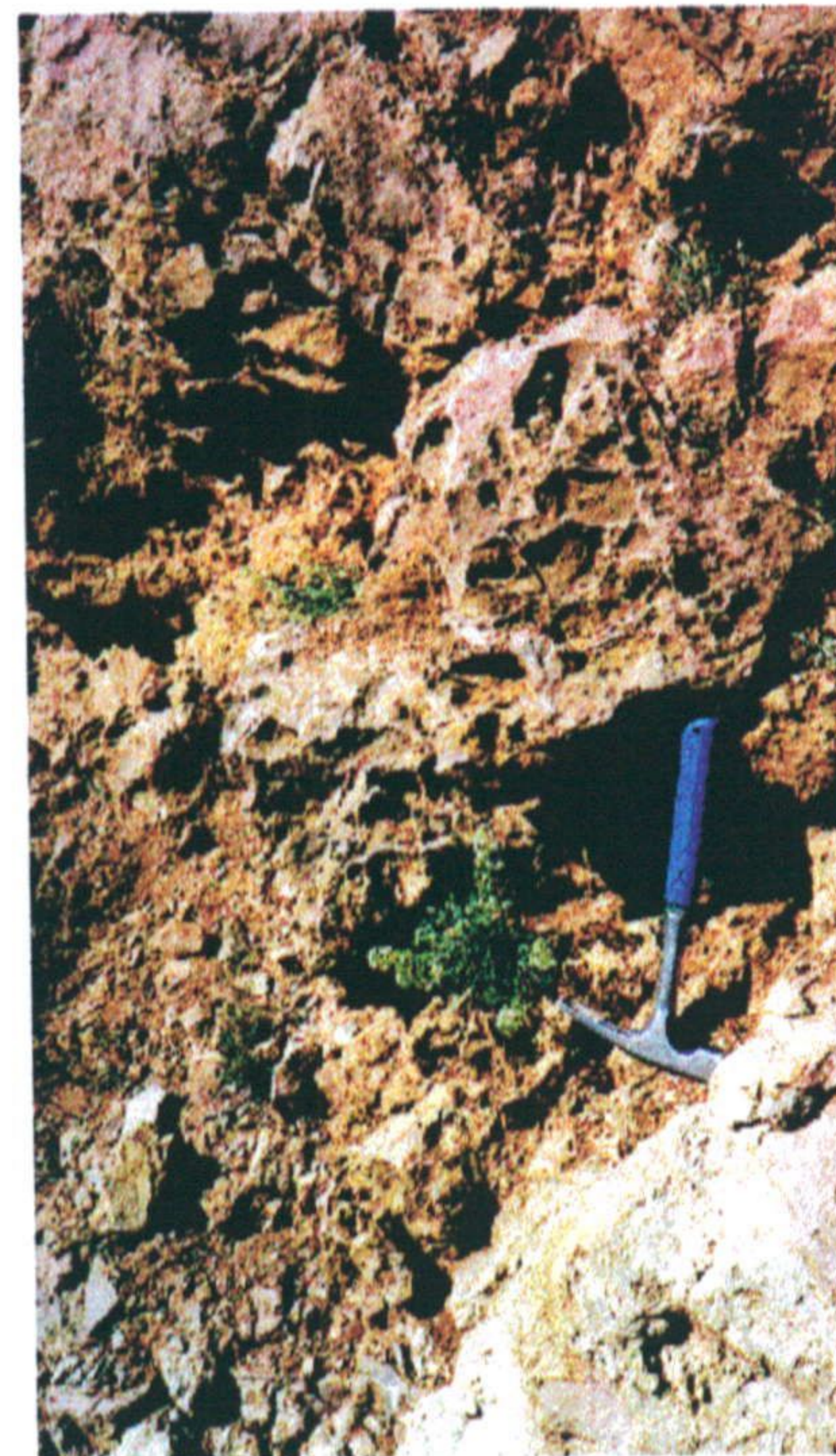


Figura 2.6. Típica meteorización en carniolas (30S UF 38149937)

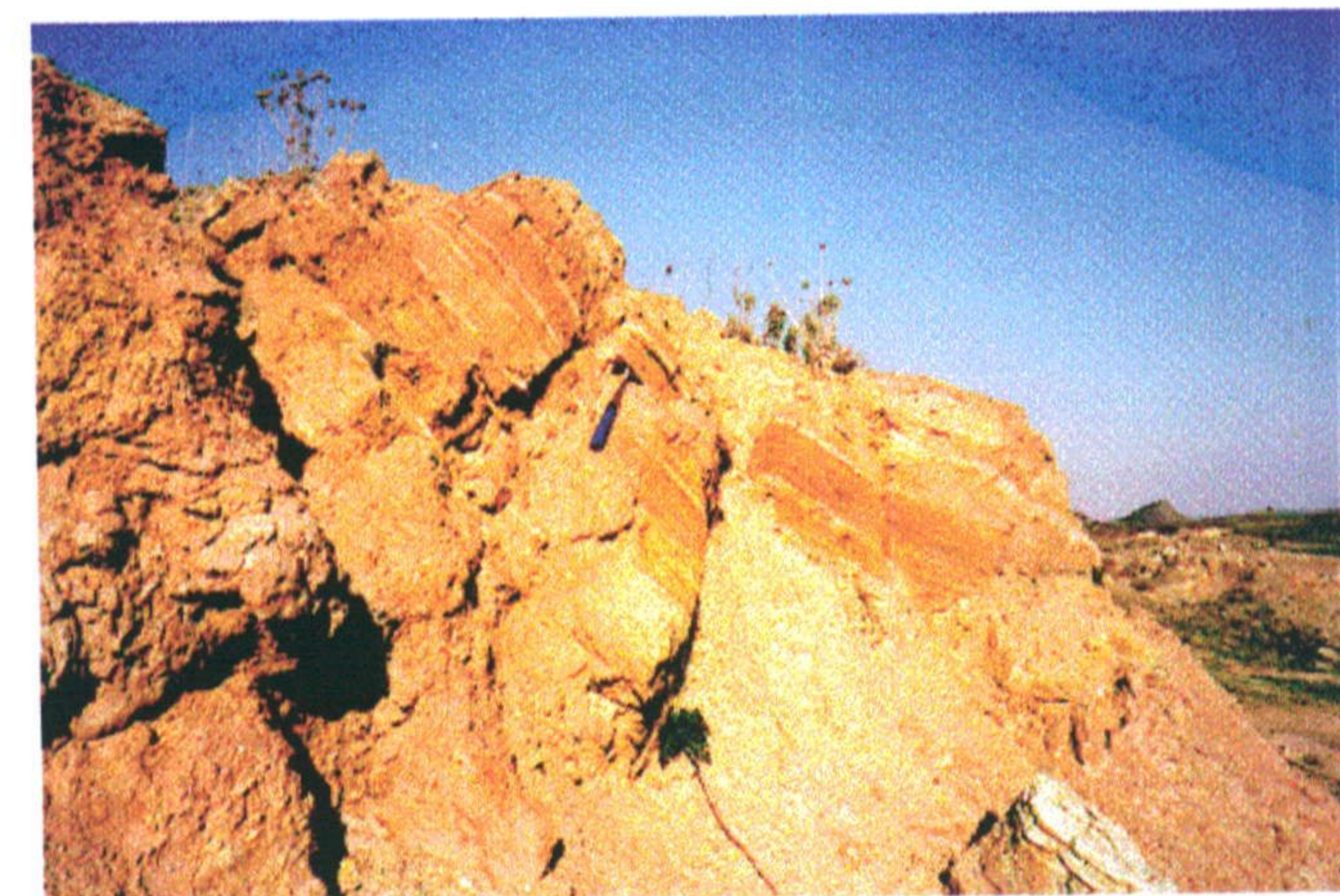


Figura 2.9. Bloques de sedimentos clásticos interestratificados con yeso (30S UF 37619896)



Figura 2.7. Fragmentos de ofita en materiales triásicos (30S UF 37749925)



Figura 2.8. Interestratificación de calizas detríticas con arcillas y margas (30S UG 35500096)

significativos y se encuentran dolomitizadas en numerosos lugares. Según Pérez López (1994) las rocas clástico - evaporíticas de la secuencia triásica pertenecen al Keuper; este autor presenta un esquema estratigráfico del Trías, admitiendo que existen variaciones locales y sigue habiendo cuestiones no resueltas. Se han publicado varios trabajos en los que se aborda el estudio del Trías de esta zona (Peyre, 1974; Cruz - San Julián, 1974; Martín Serrano, 1986). Estos autores señalan que sus descripciones tan sólo cubren una parte de la sucesión completa de rocas triásicas.

Las estructuras que afectan a los materiales triásicos son extremadamente complejas y no permiten realizar una cartografía detallada. Consecuentemente, la mayoría de las rocas triásicas se han cartografiado como una sola formación denominada "rocas clástico - salinas triásicas" (Formación 1), en ella predominan los materiales arcillosos, aunque también hay margas, areniscas y yeso (figura 2.9.). Esta formación se atribuye al Trías Subbético Indiferenciado (ITGE, 1998). En algunos lugares ha sido posible cartografiar afloramientos en los que aparecen predominantemente rocas carbonáticas, como las carniolas (Formación 2; figura 2.6.) o rocas volcánicas, como las ofitas (Formación 3; figura 2.7.). El espesor máximo de esta formación triásica puede en ocasiones superar los 500 m (Cruz San Julián, *com. pers.*).

Estos materiales están cubiertos en su mayor parte por una potente formación edáfica de color marrón oscuro. En las zonas en las que el suelo no es tan potente se pueden observar tonalidades rosáceas, muy parecidas al color del sustrato (figura 2.5.). La superficie de los afloramientos de las arcillas triásicas está ligeramente ondulada, pudiendo formar incluso pequeños cerros, con modestas elevaciones como las que se localizan alrededor de la parte oeste y sudoeste de la laguna Salada (30S UG 35920045).

Al noreste de la zona de estudio, Pérez López (1994) asigna a la zona superior del Muschelkalk y del Keuper rocas que son muy similares a las aquí descritas.

Rocas terciarias del Eoceno al Mioceno Inferior (Formación 4): Los materiales del Terciario hasta el Mioceno Inferior del área aquí considerada están constituidos por calizas y margas, que suelen aparecer estratificadas en bancos cuya potencia oscila entre 2 cm y 1.5 m (como en 30S UG 35500096, ver figura 2.8.). Diversos autores (entre ellos Martín Serrano, 1986) atribuyen este tipo de materiales preorogénicos a sedimentos tipo flysh turbidítico; son alóctonos y coinciden con los materiales de la Zona Circumbética. Cruz - San Julián (1974) estima en 200 m la potencia máxima de estos materiales en el área de Campillos. Los fósiles hallados en estas rocas indican que son del Eoceno, Oligoceno e incluso del Mioceno Inferior (Martín Serrano, 1986). Microfósiles típicos de estas litologías son los Nummulites (*Nummulites sp.*).

Formaciones Postorogénicas

Rocas del Mioceno Superior (Formación 5): Son de naturaleza calcarenítica. Las láminas delgadas muestran fósiles de algas rojas incrustantes, briozoos y lamelibranquios (Martín Serrano, 1986), de estos últimos se encontraron trozos de *Pecten sp.* (ejemplo, en 30S UG 38120046). Presentan tonos anaranjados y amarillentos característicos (figura 2.10.). Las pendientes en las areniscas bioclásticas son mayores que las desarrolladas sobre materiales paleógenos (margas y calizas) debido a su mayor resistencia a la erosión. Son materiales discordantes y, lógicamente, no muestran el



Figura 2.10. Aspecto de las calcarenitas del Mioceno Superior en el Cerro del Romeroso (corte 6 del mapa suplementario)

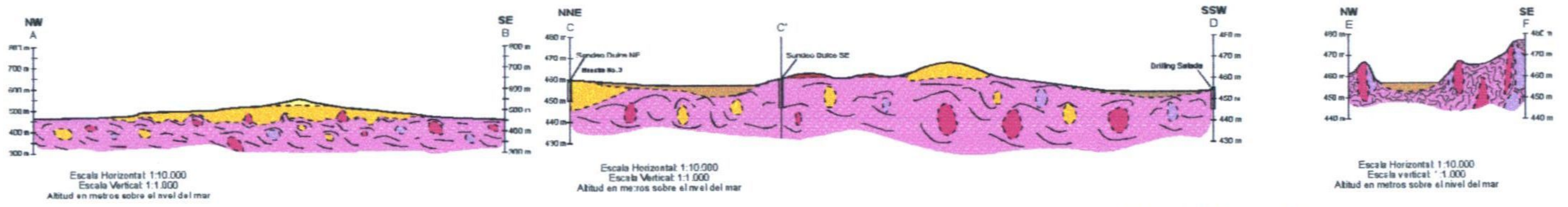
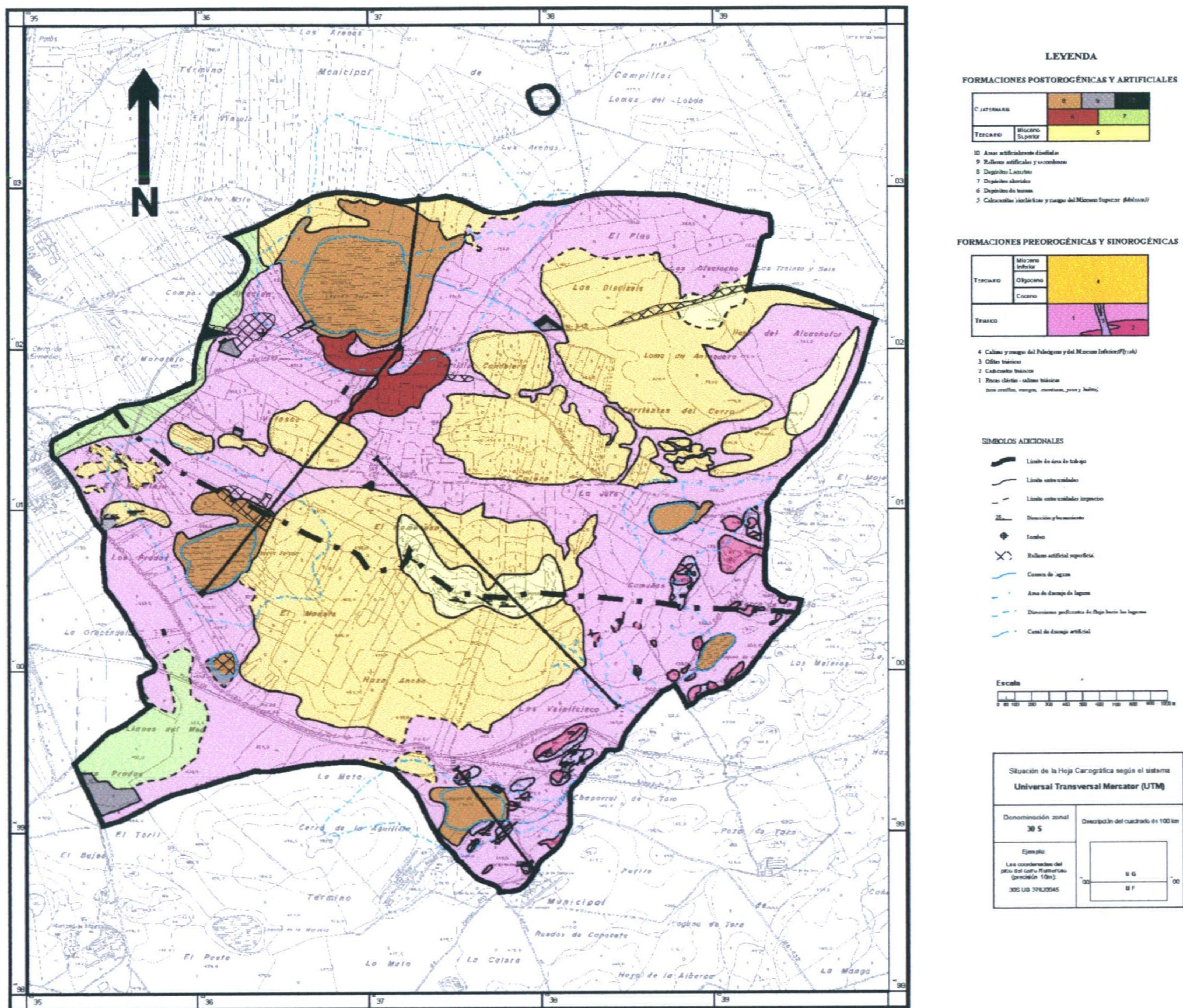
intenso plegamiento que caracteriza a rocas más antiguas, tanto triásicas como paleógenas. Su dirección y buzamiento puede medirse en varios lugares alrededor del cerro Romeroso (ejemplo, 120/10 NE en 30S UG 37230071 y 101/25 N en 30S UG 37510044). La edad de estos sedimentos ha sido asignada al Tortoniense Superior (Peyre, 1974) y al Tortoniense - Messiniense (Baena *et al.*, 1986) en el mapa geológico de Campillos.

Rocas cuaternarias (Formaciones 6, 7 y 8): Los sedimentos más recientes del área de estudio corresponden a materiales aluviales y depósitos lacustres. No ha sido posible determinar su edad, si bien Cruz - San Julián (1990) atribuye a materiales fluviales similares en la región de Teba una edad correspondiente al Pleistoceno Superior. La sedimentación en los vasos lacustres corresponde al Holoceno. Los depósitos de terraza (Formación 6) tan sólo aparecen al sur de la Laguna Dulce. En una matriz limosa de color grisáceo aparecen cantos redondeados de rocas paleógenas, triásicas y también de edad jurásica (Lías Inferior), y en menor proporción cuarcitas. Estos depósitos representan los materiales cuaternarios más antiguos del área de estudio.

Los depósitos aluviales (Formación 7), en el área de estudio están compuestos fundamentalmente por limos y arcillas, con pequeñas cantidades de arena, de colores grisáceos o marrones claros. Corresponden a ambientes de poca energía. Este tipo de sedimentos se ha identificado con claridad en zanjas artificiales al sudoeste de la Laguna Dulce (30S UG 35970178) y en dos sondeos manuales; el 5 (30S UG 35950176), en el que se encontraron limos de color marrón claro y el 42 (30S UG 35890009), que se encuentra sobre el sustrato triásico y en el cual el limo estaba mezclado con arcillas de color oscuro, probablemente de origen edáfico.

Los depósitos lacustres (Formación 8) se encuentran en el fondo de las lagunas y en zonas deprimidas que se inundan en periodos de precipitaciones excepcionalmente abundantes. Están constituidos por arcillas de color gris oscuro, cubiertas por una capa orgánica de color negro de algunos centímetros de espesor. El examen de las muestras

Mapa Geológico de la Reserva Natural Lagunas de Campillos



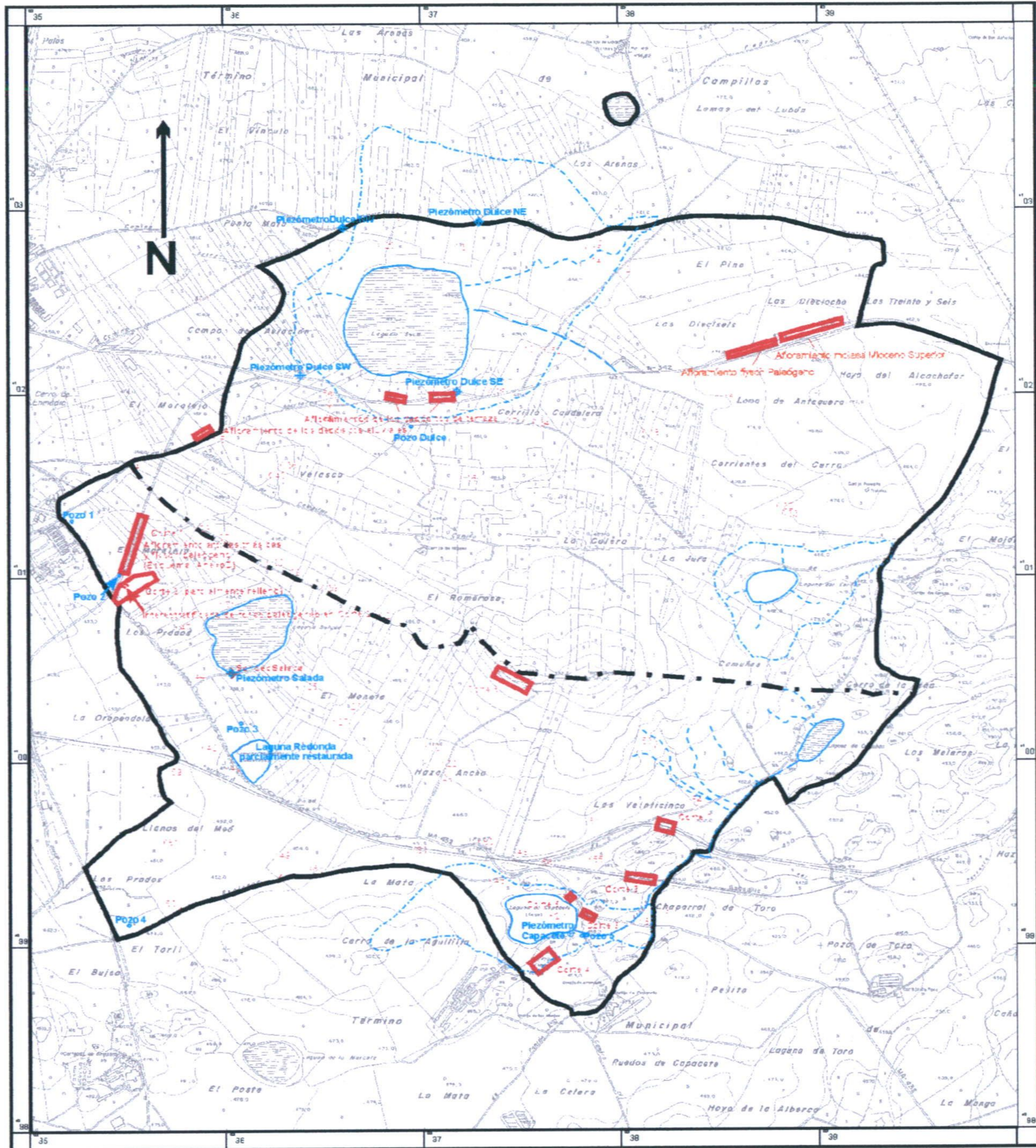
Columna estratigráfica esquemática (Escala: 1:1.000, verticalización sin escala)



Figura 2.11. Cartografía Geológica

Mapa complementario a la cartografía de la Reserva Natural Lagunas de Campillos

Afloramientos, Sondeos, Piezómetros, Cuencas Vertientes



LEYENDA

- Límite del área de estudio
- Afloramiento
- Testigo de sondeo
- Sondeos manuales (con número)
- Piezómetro
- Pozo
- Zona de máxima inundación laguna
- Cuenca endorréica laguna
- Fugas preferentes
- Canal de drenaje artificial

Situación de la Hoja Cartográfica según el sistema Universal Transversal Mercator system (UTM)

Denominación zonal	Descripción del cuadrado de 100 km		
36 S			
Ejemplo:			
Las coordenadas del pico del cerro Romeroso (precisión 100 m):			
306 UG 3792045	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">UG</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">UF</td> </tr> </table>	UG	UF
UG			
UF			

Mapas topográficos base: Hojas del Mapa Topográfico de Andalucía:
 Antequera 16-42 (1023); 1-3 Escala 1:10.000
 Antequera 16-42 (1023); 1-4 Escala 1:10.000
 Camillos 15-42 (1322); 4-3 Escala 1:10.000
 Camillos 15-42 (1322); 4-4 Escala 1:10.000

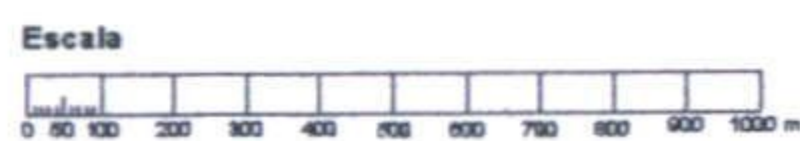


Figura 2.12. Mapa complementario

superficiales indica un abundante contenido en limos y arcillas, y un análisis mineralógico de estos sedimentos muestra que contienen, en orden de abundancia: filosilicatos, calcita y cuarzo, con pequeñas cantidades de yeso y halita (Almécija, 1997). La cantidad de sales varía en función de la salinidad de cada laguna en particular. Cuando la laguna se seca, la superficie arcillosa se suele cubrir con una capa de arenas eólicas de grano fino. En las lagunas más saladas, se forma una costra salina de color gris claro que tiene un espesor de varios cm., y que vuelve a disolverse total o parcialmente cuando comienza la estación húmeda. Está compuesta fundamentalmente de yeso, con cantidades variables de halita. En la laguna Salada se desarrollan estructuras tipo "tepee". Han sido muestreados en los sondeos manuales 3 (30S UG 37180279), 38 (30S UG 36310104) y 62 (30S UG 37729916) entre otros. Los sondeos manuales no son apropiados para determinar la potencia exacta de estos sedimentos, pero parecen indicar que no superan unos cuantos metros como máximo. Los depósitos lacustres son los más recientes del área de estudio, y su sedimentación sigue siendo activa.

Se han añadido en el mapa otras dos tramas que pueden ser de interés para posteriores estudios geológicos o hidrogeológicos.

Cobertera artificial (trama 9): Se ha utilizado en los casos en los que una delgada capa, siempre inferior a 1 m, de vertidos, escombros o suelos agrícolas cubrían el área en cuestión. Por último, en negro (trama 10) se ha señalado los cortijos, almacenes, etc. localizados dentro de los límites de la Reserva Natural.

2.4.3.2. Reserva Natural Albuferas de Adra

En la figura 2.13. se indica la situación de los dispositivos que se han utilizado para la caracterización de la naturaleza y geometría del sustrato del acuífero del delta de río Adra, en el sector de la Reserva Natural. El acuífero está compuesto por materiales mio - pliocenos y cuaternarios sobre un sustrato metapelítico correspondiente al Manto de Adra del Dominio Alpujarride. Existen cambios de facies marinas en los materiales mio - pliocenos: conglomerados, areniscas, margas, calcarenitas y calizas bioclásticas (Aldaya *et al.*, 1983). Estos materiales afloran al norte de la CN - 340 y están afectados por fracturas, entre las que destacan las fallas normales de dirección aproximada N150E, con movimientos de hundimiento de los labios meridionales. En los depósitos cuaternarios, al sur de la mencionada carretera, se distinguen sedimentos aluviales y otros de granulometría más fina y colores negruzcos, correspondientes a facies de albufera o marisma, sobre los que se asientan los sistemas lacustres estudiados.

El conocimiento de la geometría de este acuífero es bastante incompleto, y se dispone únicamente de datos bien contrastados a partir de un escaso número de sondeos de reconocimiento. Basándose en esta información, se ha planteado un modelo (ITGE, 1998) en el que el sustrato impermeable bajo las lagunas puede estar entre 50 y 150 m de profundidad; encima una sucesión mio - pliocena, culminada por unos 20 m de sedimentos de facies de albufera o marisma.

Los SEVs han puesto de manifiesto la existencia de un sustrato con una resistividad de 50 ohm*m que se interpreta como correspondiente a materiales metapelíticos (filitas). Su profundidad es de alrededor de 70 m en los dos SEVs situados en los extremos del perfil. En el intermedio la profundidad es menor, unos 40 m, lo que

podría indicar el efecto de hundimiento progresivo hacia el suroeste motivado por las fracturas N150E antes comentado.

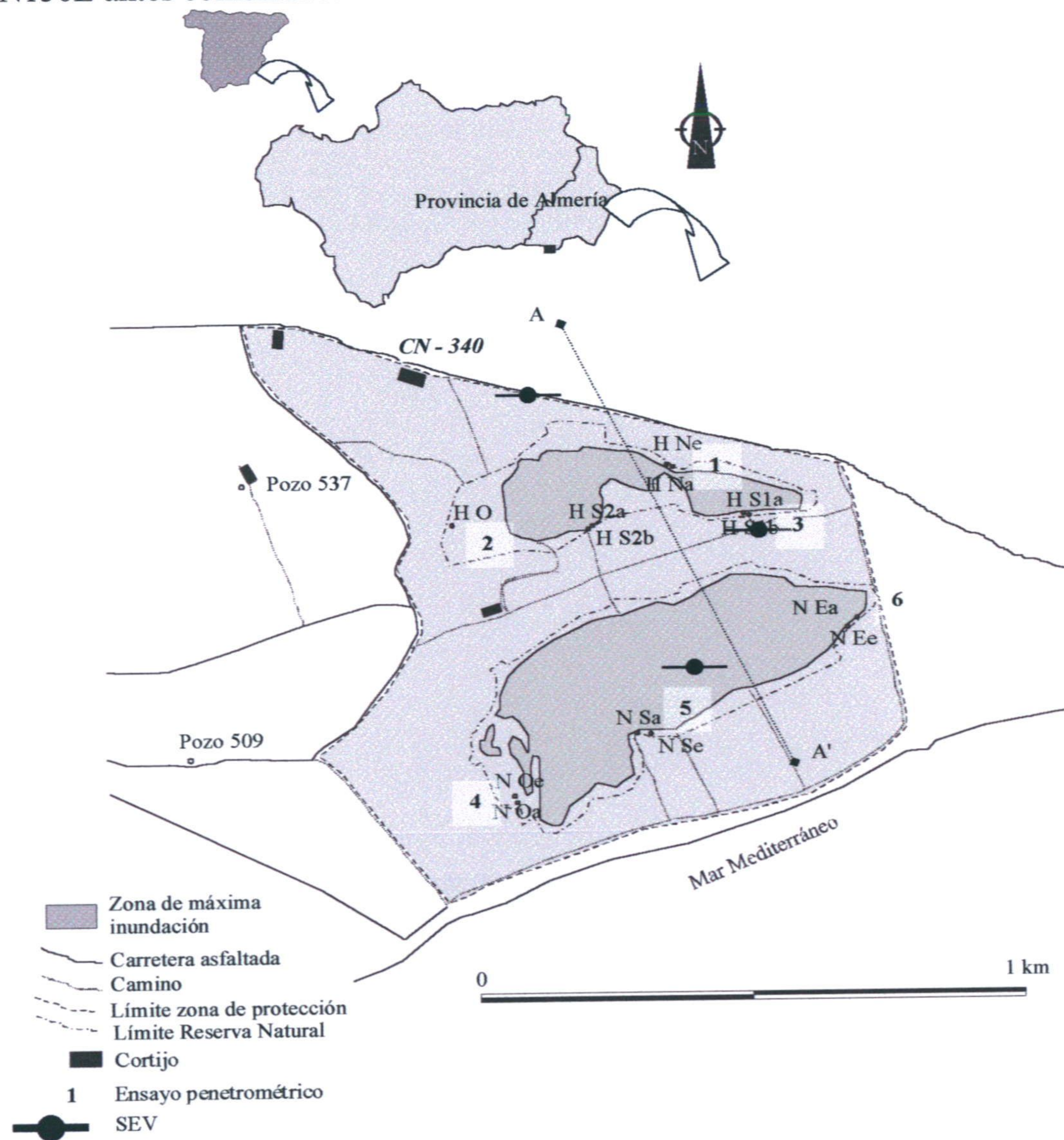


Figura 2.13. Localización geográfica y situación de piezómetros, penetrómetros y Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)

El SEV más septentrional indica materiales conglomeráticos (resistividades entre 100 y 500 ohm*m) hasta el sustrato, lo que es acorde con la naturaleza geológica de los afloramientos en el sector al norte de la CN-340. Se identifica una capa superficial no saturada de unos pocos metros y luego otra, menos resistiva, saturada con agua dulce.

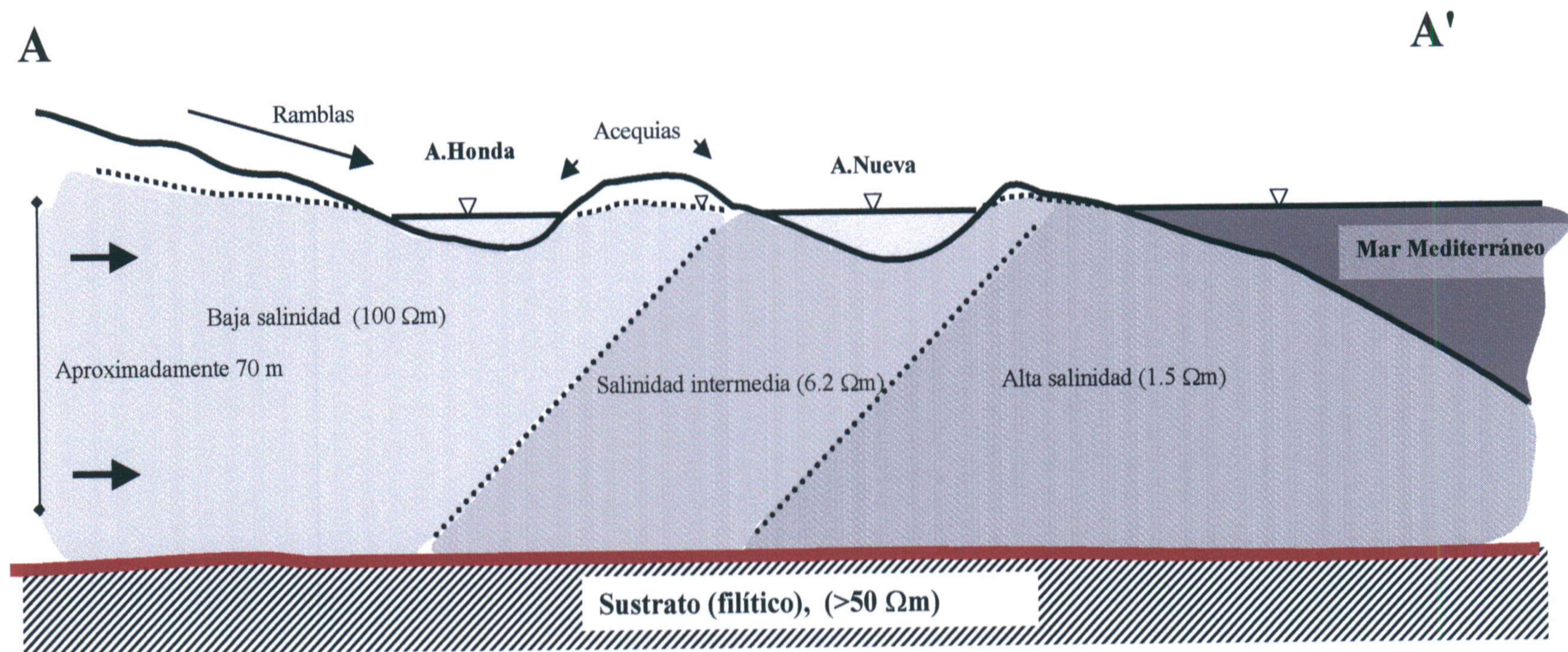


Figura 2.14. Modelo conceptual del sector estudiado a partir de los datos de resistividad

Los dos SEVs más próximos al mar indican materiales sueltos con predominio de arenas (entre 1 y 100 ohm·m), que son los que corresponden propiamente al sector en que se encuentran las lagunas. En los dos primeros metros se identifican materiales de alteración o de relleno artificial. La resistividad medida en el SEV más próximo al mar, entre 1 y 2 ohm·m, se identifica con el efecto de agua salada de saturación. En este sector existió hasta hace pocos años una pequeña laguna con salinidad próxima a los valores característicos del mar (entre 20 y 40 mS/cm de conductividad: Martínez Vidal y Castro, 1990). Los valores entre 5 y 10 ohm·m que se encuentran en el SEV intermedio sugieren un agua de saturación de tipo salobre. La influencia de la salinidad del agua en la resistividad de los sedimentos permeables que la contienen es, pues, determinante en el sector estudiado. El modelo conceptual (figura 2.14.) integra los resultados del perfil geoelectrico A-A' (figura 2.13.) y representa una amplia zona de transición entre las aguas relativamente poco salinas del acuífero y las aguas saladas que lo saturan en el sector más próximo al borde costero. Este modelo es coherente con un flujo hacia el mar desde el acuífero muy poco importante. También con los valores de conductividad eléctrica que se registran en las aguas de las lagunas y en la franja superior del acuífero en el sector estudiado, como se verá en el capítulo 4, de características químicas del agua.

En la figura 2.15. se representan los valores del número de golpes (n) necesario para introducir 20 cm la puntaza del penetrómetro respecto de la profundidad en algunos de los ensayos realizados. Esto permite tener una idea general de la naturaleza de los sedimentos en el entorno inmediato de las lagunas hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. En el más profundo y más próximo a la costa (figura 2.13., nº 4) se identifica una capa superior, de unos 4 m, de arenas finas y medias, sin fangos, bajo la que aparecen sedimentos más gruesos (arenas gruesas y gravas). La capa superior también se identifica en el ensayo nº 6, aunque con un nivel más blando de fangos hacia los 2 m de profundidad; entre los 4 y los 5 m aparece un nivel de gravas. La existencia de fangos y gravas en el seno de un medio de arenas finas también se desprende de lo registrado en los 5 m del ensayo nº 1. El nº 2 se localiza en el extremo final de la rambla de La Estanquera; se observa en los resultados del ensayo un incremento progresivo de la granulometría de los sedimentos con la profundidad. La presencia de niveles de fangos orgánicos y de gravas en el seno de un material arenoso fino predominante se ha podido comprobar a partir de las muestras obtenidas en los piezómetros realizados manualmente.

En resumen, los resultados del reconocimiento geológico, realizado mayoritariamente a partir de técnicas geofísicas, en el sector de las Albuferas de Adra, sugieren la existencia bajo las lagunas y en su entorno inmediato de un medio arenoso con niveles de gravas y de fangos orgánicos. Estos materiales detríticos alcanzan una profundidad entre 50 y 70 metros y se encuentran saturados con aguas de diferente salinidad, desde dulce hasta salada. Esto configura una zona de transición de espesor relativamente elevado, seguramente como consecuencia del escaso flujo subterráneo procedente del acuífero hacia el mar en ese sector. Estos resultados son coherentes con los obtenidos a partir de mediciones piezométricas y del balance hídrico en las albuferas (capítulo 3), y con las características químicas del agua superficial y subterránea (capítulo 4). Con esta información se ha establecido el modelo de funcionamiento hídrico en las albuferas, como se verá en el capítulo 3.

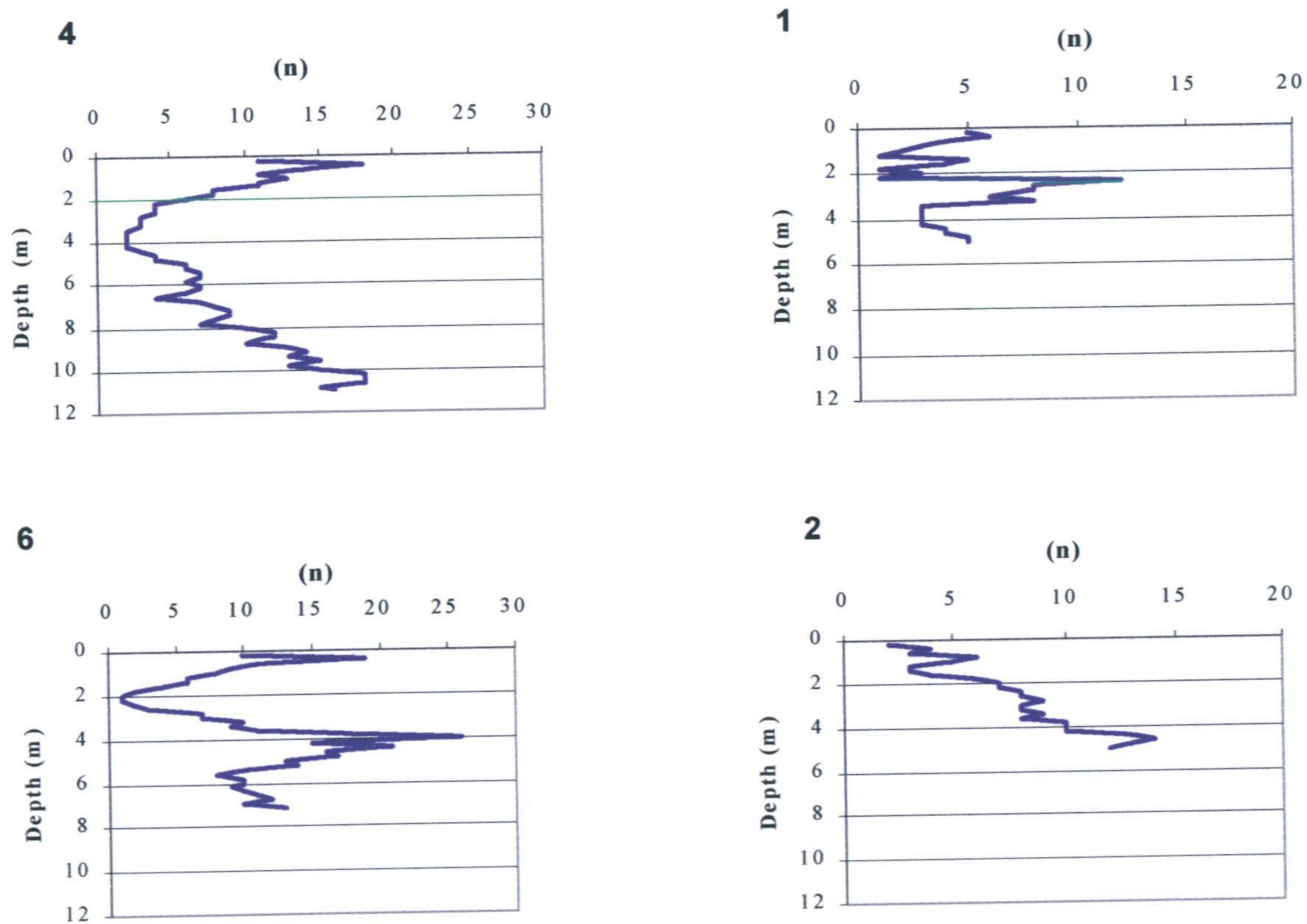


Figura 2.15. Representación gráfica de los resultados de los ensayos penetrométricos

2.4.4. Geomorfología

Las características geomorfológicas de estos complejos palustres están condicionadas por la litología de las rocas en las que están instaladas las lagunas, para el caso de las interiores, mientras que para las costeras la influencia principal deriva de los procesos litorales o fluvio - litorales, así como de actividades antrópicas en el caso de las lagunas de la desembocadura del Guadalhorce. La mayoría de las zonas húmedas interiores incluidas en este estudio están situadas en afloramientos de materiales triásicos, o en áreas en las que estos materiales se encuentran a escasa profundidad bajo recubrimientos poco potentes de materiales postorogénicos (Mioceno, Plioceno o Cuaternario).

La karstificación de los materiales triásicos es el principal factor que influye en la génesis de las lagunas del norte de la provincia de Málaga. En todo caso, incluso en las lagunas situadas sobre materiales triásicos, existen ciertas diferencias relacionadas con el tipo de sustrato (Almécija, 1997) y de karstificación, de modo que, en general, pueden distinguirse tres grupos de lagunas en función de las características geomorfológicas de la zona en que se sitúan (figura 2.16.).

2.4.4.1. Lagunas kársticas

Según Pezzi (1977), hay tres tipos de dolinas en el sector de Los Hoyos:

- De **hundimiento**, las más abundantes.
- De **absorción** de un curso de agua, las de mayor tamaño.
- En **artesa**, dolinas y también uvalas: debidas a un desarrollo posterior de las de hundimiento, el fondo de las depresiones se iría colmatando por el aporte de materiales procedentes de los bordes, de pendientes más suaves.

Las lagunas Grande y Chica de Archidona corresponden a dolinas de hundimiento (Pezzi, 1977) situadas en un área en la que este tipo de formas de modelado es muy frecuente: según Durán y Molino (1986), se presentan con una densidad media de 5 dolinas por kilómetro cuadrado. No todas estas dolinas almacenan agua, y las únicas que lo hacen de manera permanente son las lagunas Grande y Chica. Esta última, durante las etapas más drásticas de sequía ha llegado a experimentar la pérdida total de agua almacenada, aunque los sedimentos de su vaso estaban prácticamente saturados.

Las lagunas Grande y Chica están situadas en los bordes de la estructura diapírica que constituye el sector de Los Hoyos, en la que las depresiones situadas en la zona central presentan menor diámetro (menos de 50 m) y escaso relleno. Según Pezzi (1977) y Calaforra (1996) hay una cierta relación entre las direcciones dominantes de las estructuras que afectan a los materiales triásicos y la disposición de las dolinas. La dirección de los ejes dominantes de las dolinas es relativamente variada (N 60 E, N 30 E y N 150 E), pero ello es debido a que las estructuras sobre las que se instala este karst yesífero no son lineales, sino que se trata de pequeños diapiros subcirculares (Pineda, 1991).

Las lagunas de Caja y Viso también se localizan directamente sobre materiales triásicos. De hecho, se trata de la prolongación occidental del afloramiento en que aparecen las lagunas de Archidona. En este caso, sin embargo, la variabilidad litológica es mayor, sobre todo en lo relativo a la presencia de carbonatos. Tampoco son tan abundantes los diapiros cerrados.

2.4.4.2. Lagunas esteparias, karstificación superficial

El resto de las lagunas interiores consideradas son más heterogéneas en lo que se refiere a la naturaleza de los materiales sobre los que están situadas y aunque, como hemos comentado, los materiales triásicos constituyen el sustrato en todos los casos (Linares, 1991), sobre éstos hay depósitos postorogénicos de distinta naturaleza y edad.

Tanto en el sector de Campillos como en el de Fuente de Piedra y la Ratosa se observa un cierto condicionamiento litológico de las pendientes de las laderas de las depresiones ocupadas por lagunas (Almécija, 1997). Así, en los materiales triásicos las pendientes más elevadas (mayores del 10 %) se relacionan con afloramientos de rocas carbonáticas e ígneas, como ocurre con los afloramientos de ofitas de la laguna de Capacete. En los afloramientos de depósitos cuaternarios, más incoherentes, las pendientes son menores del 2%. Por último, en los materiales margosos del Eoceno - Mioceno inferior las pendientes topográficas presentan valores intermedios (3 - 8 %). Las acciones antrópicas, particularmente el laboreo agrícola, han modificado estas pendientes, sobre todo en algunas lagunas, como la Dulce de Campillos.

Lhénaff (1981) relaciona la génesis de las lagunas con procesos de disolución

kárstica que tienen lugar en el substrato triásico existente a escasa profundidad. Su hipótesis sugiere que la formación de las lagunas se debe a los citados procesos de disolución, que generan conductos que son obstruidos por la acumulación del residuo arcilloso insoluble, lo que permite el estancamiento del agua. Normalmente, la profundización del relieve acelera la formación de dolinas y las aísla en los interfluvios estrechos, donde la circulación de las aguas es rápida; las lagunas formadas son, en consecuencia, pequeñas. Mención aparte merece la extensa laguna de Fuente Piedra, que se sitúa en un área de relieve ondulado, en la divisoria de aguas, entre el Genil, afluente del Guadalquivir y el Guadalhorce, es decir la divisoria Atlántico - Mediterránea. El carácter poco definido del relieve en este sector y la lentitud del flujo subterráneo han dado lugar a que no se desarrolle suficientemente un emisario superficial.

Sánchez Navarro (1989) propone un modelo genético para la formación de las depresiones cerradas de los Monegros que podría ser válido para las lagunas del sector de Antequera. La excavación de estas depresiones se iniciaría a partir de la disolución de calizas y yesos por las aguas meteóricas que se infiltran y se incorporan al flujo subterráneo general. Cuando la excavación alcanza la superficie piezométrica, se interrumpe la infiltración y la evacuación subterránea del agua, lo que produce el estancamiento periódico de la depresión formada. La continua evaporación del agua de la laguna induce un flujo subterráneo que converge hacia ella; aquí la situación se denomina de "drenaje impedido", ya que el flujo subterráneo no drena las aguas, con lo cual no se evacúan las sales, sino que, al contrario, los flujos ascendentes aportan más sales a la laguna. La evaporación del agua en la laguna provoca la acumulación de sales y restos orgánicos en la depresión, con lo que se configuran superficies extremadamente planas típicas de estos medios "sebjka" o "playas". En una última fase, el proceso permite que se produzca un avance lateral del área de influencia y consecuentemente cada vez son más frecuentes los flujos subterráneos que convergen hacia la laguna. La única evacuación natural posible de las sales es la producida por el viento.

Ambas hipótesis sostienen que el proceso principal de formación es la disolución, lo cual parece obvio a tenor de las formaciones que se observan en toda la región. Ahora bien, en las lagunas estudiadas, al menos en el área de Fuente de Piedra, es claro que se produce un flujo hacia la laguna, que es la zona natural de descarga del acuífero o, en algunos casos, acuitardo. Se observa la progresiva colmatación de algunas de las lagunas, por ejemplo de la laguna Dulce, proceso que se acelera con el laboreo agrícola que se produce muy cerca del límite de las mismas, y que en algunos casos llega a alcanzar la propia cubeta.

2.4.4.3. Lagunas costeras

Las lagunas de la desembocadura del río Guadalhorce se sitúan sobre los materiales aluviales depositados en el delta, que forman la vega del Bajo Guadalhorce. Se trata de una superficie prácticamente plana, situada a una cota de 1 a 4 m sobre el cauce del río. La morfología de estas lagunas y la de las Albuferas de Adra son muy similares, al corresponder en ambos casos a áreas deltaicas, aunque las lagunas se han originado, como ya se ha comentado, por procesos muy distintos.

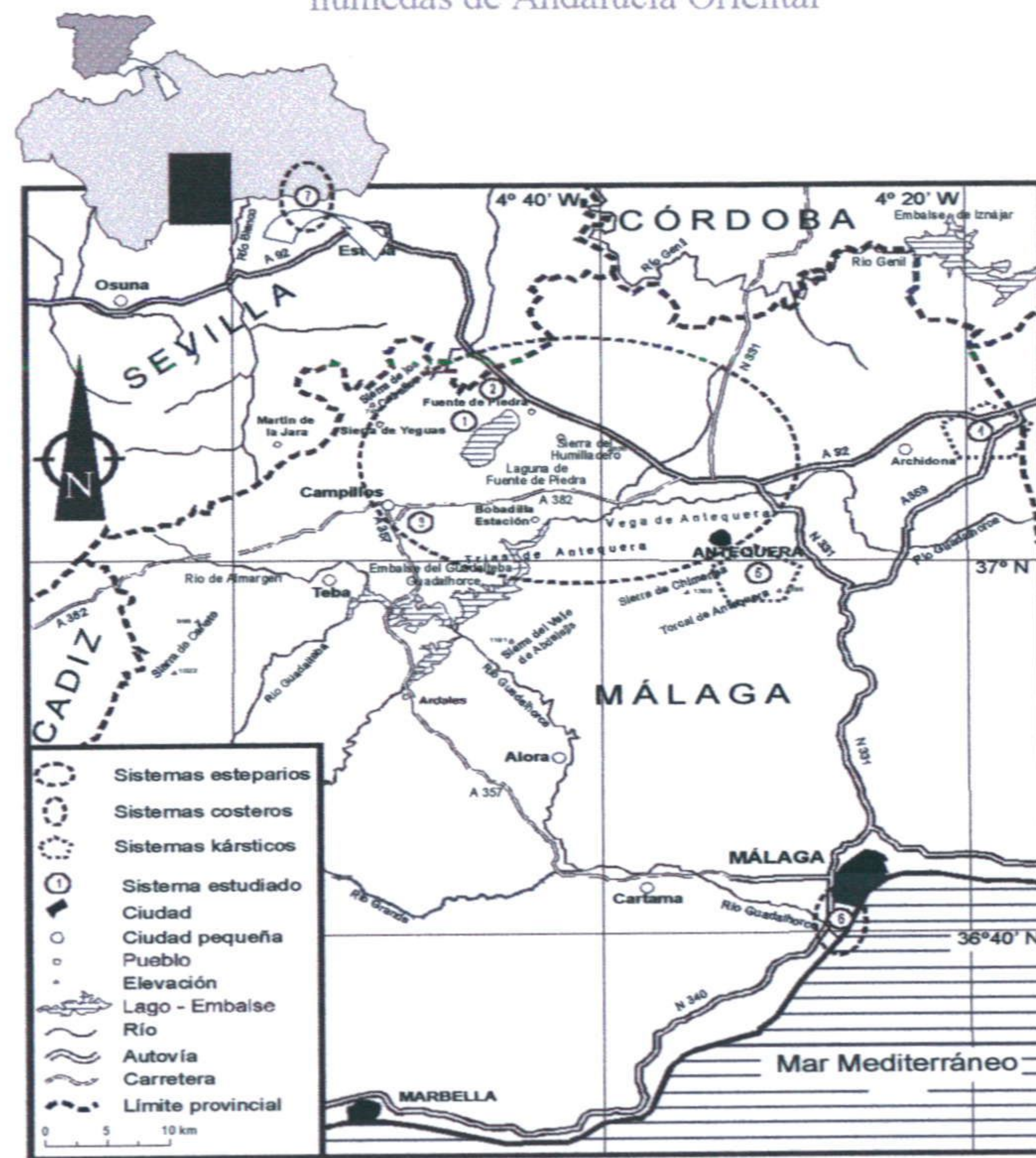


Figura 2.16. Tipologías geomorfológicas de los sistemas estudiados

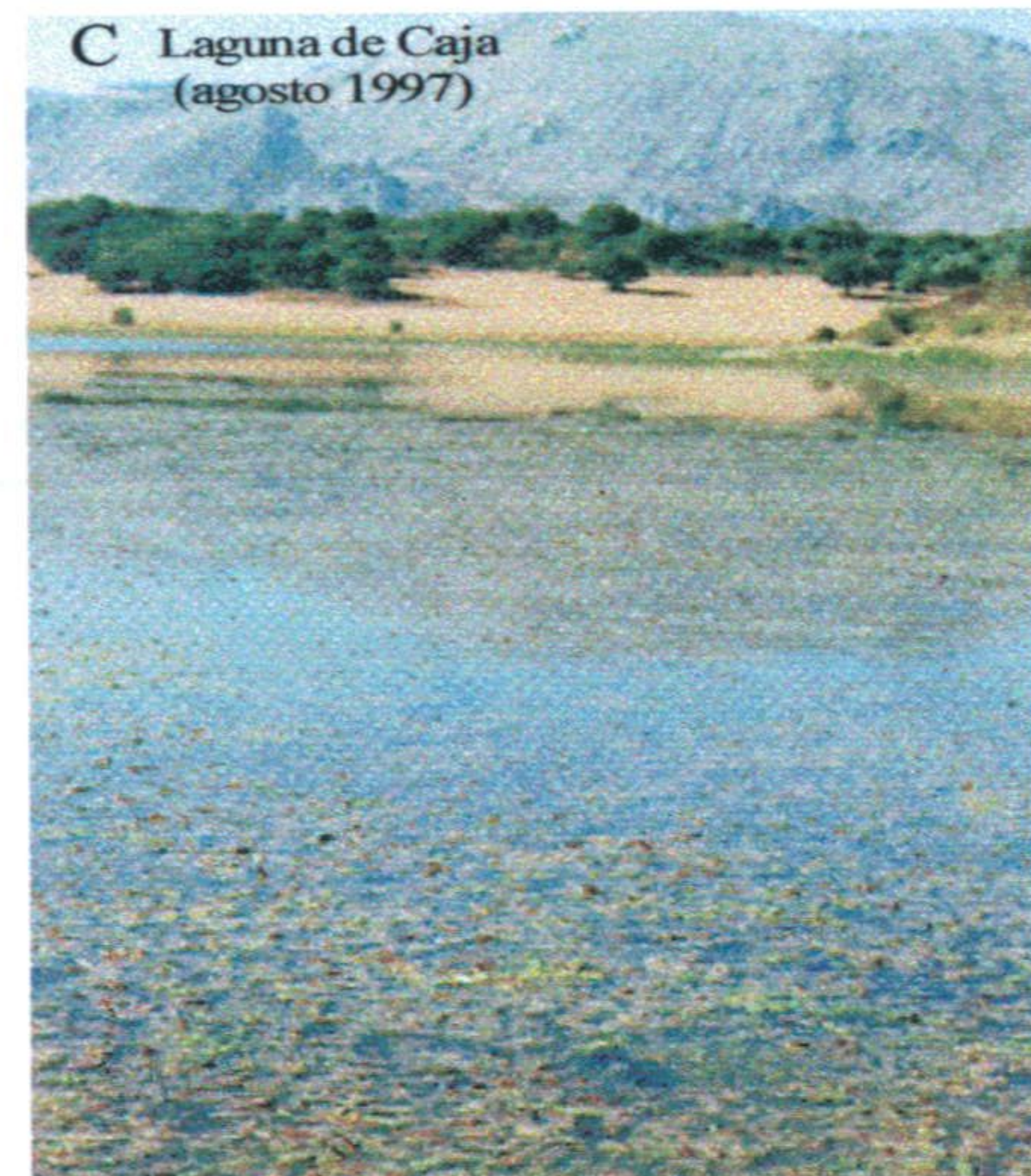
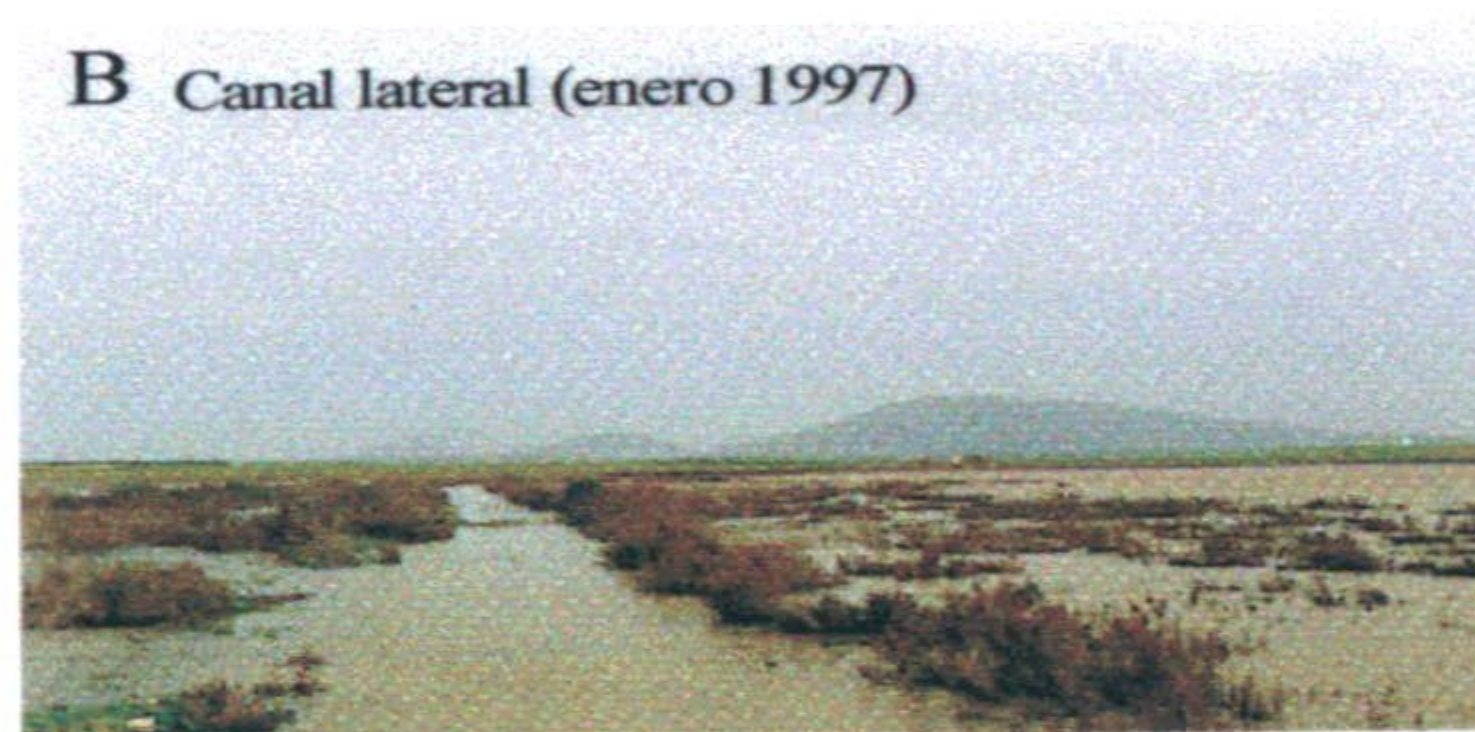
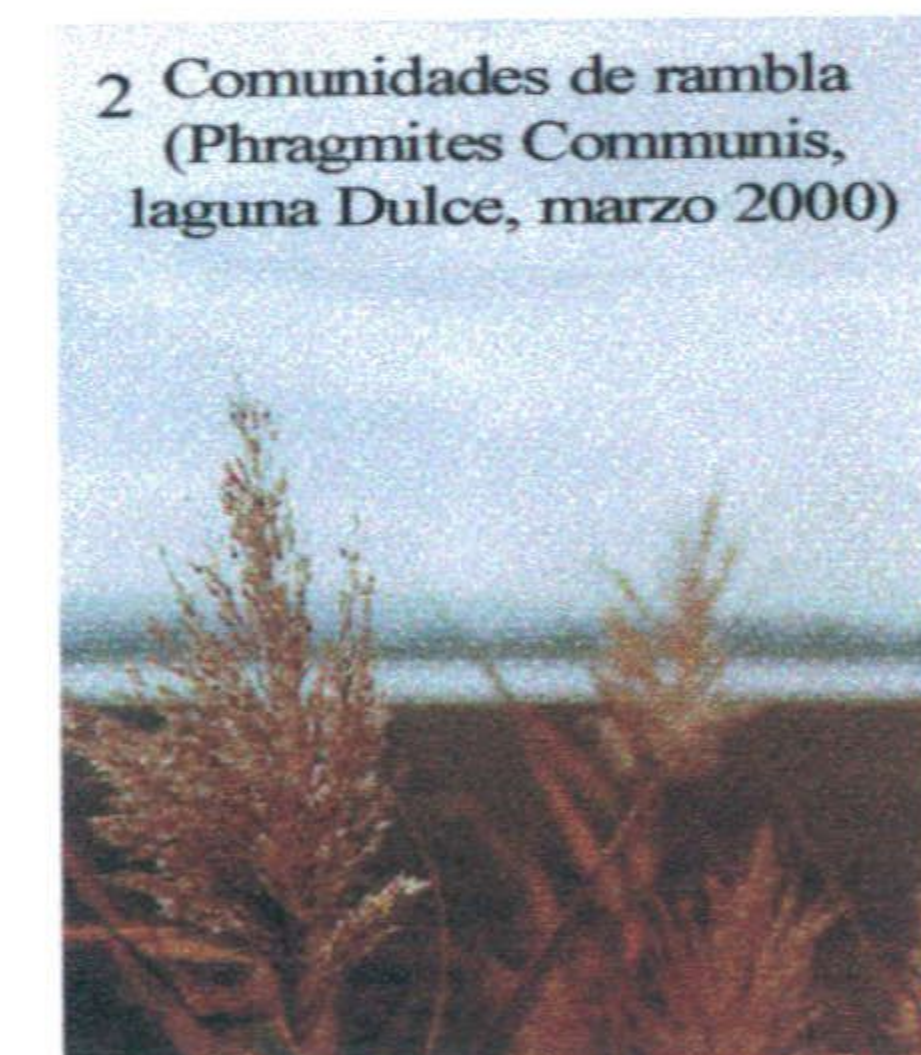
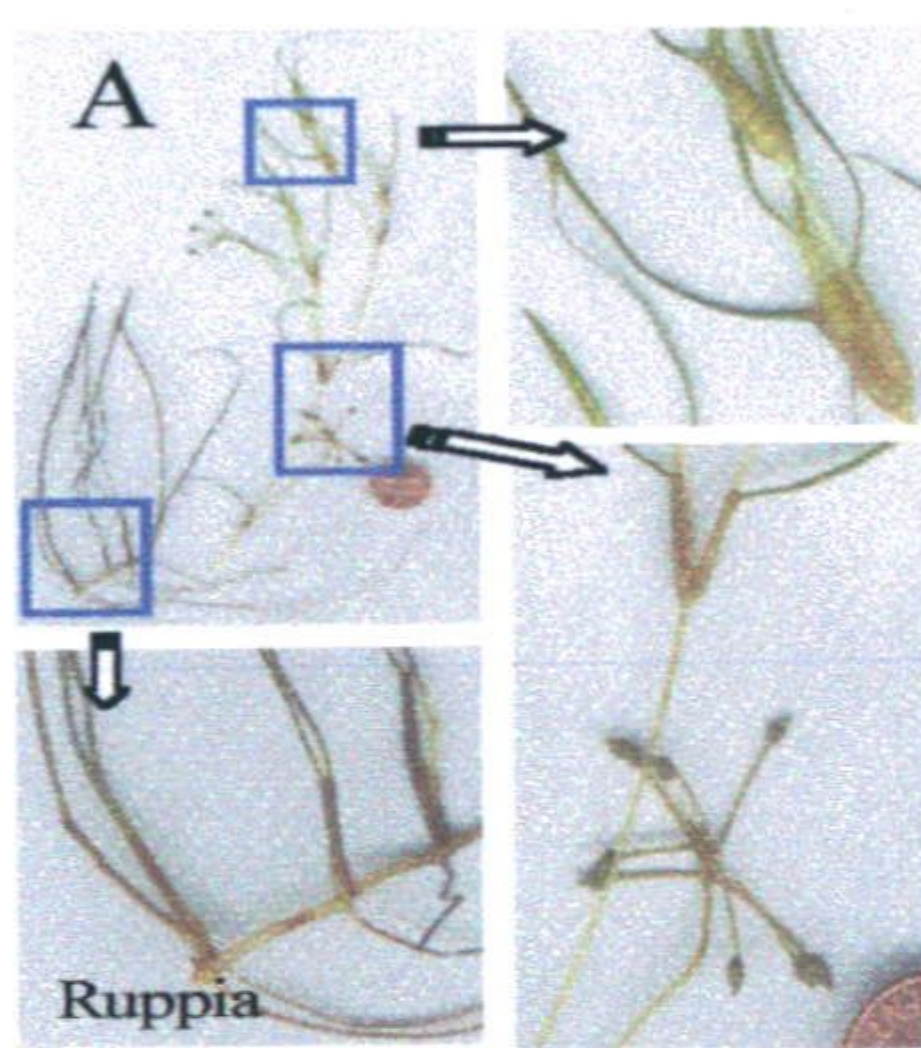
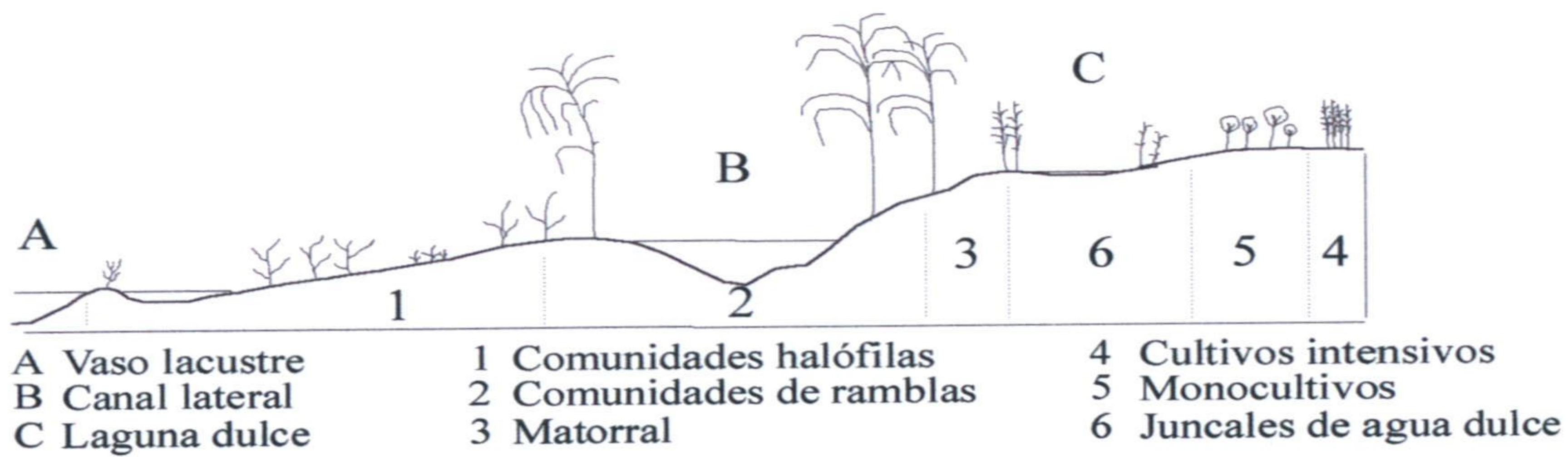


Figura 2.17. Croquis esquemático de la distribución de la vegetación en la laguna de Fuente de Piedra y figuras de la vegetación característica en algunos de los sistemas estudiados

El río Adra (El Amrani, 1997) discurre en las proximidades de su desembocadura en afloramientos de materiales pliocenos y cuaternarios, sobre los que se modelan pendientes muy suaves. El relieve de los materiales pliocenos corresponde a un abanico aluvial sobre el que se han desarrollado algunas terrazas marinas y glacis cuaternarios. Los materiales transportados se acumulan en un delta que, a su vez, es erosionado por las corrientes litorales que distribuyen los sedimentos, formando una serie de barras que han individualizado las albuferas Honda y Nueva.

Es necesario añadir que la actividad antrópica puede actuar como agente geomorfológico a gran escala. En este caso debido a las masivas deforestaciones que se llevaron a cabo a principios del siglo XIX y cuyas consecuencias aparecieron tres décadas más tarde con un incremento de las avenidas y los acarreo. Se desvió el cauce del río para evitar las inundaciones en el pueblo, lo cual causó la erosión de la parte occidental del delta. Posteriormente, a principios del siglo XX, se construyó el puerto con la consecuente excavación de una cantera para la construcción de las escolleras, que influyen en las corrientes de deriva litoral. La tercera fase de actuación humana comenzó en los años setenta del pasado siglo, con la proliferación de cultivos bajo plásticos. El encarecimiento del suelo provoca que se obtenga de otros lugares, aterrazando terrenos tanto post como pre - orogénicos.

2.5. Vegetación

La colonización vegetal de un humedal se suele organizar de acuerdo con tres estrategias que definen tres tipos biológicos principales: los helófitos (eneas, juncos, carrizos), que tienen el aparato vegetativo parcialmente sumergido y las raíces completamente sumergidas; los anfítos, (ranúnculos, nenúfares) que tienen las hojas inferiores sumergidas y las superiores flotantes; y los limnófitos, independientes del medio aéreo (fanerógamas, algas carofitas y filamentosas). Por otra parte, debido a la alta salinidad de los suelos en la mayoría de estas lagunas, son también importantes las comunidades de halófitas, plantas adaptadas a suelos con una elevada salinidad, y que suelen pertenecer a la familia Quenopodiaceae. Por último, el término freatofitas tiene un uso variable, pero en general se refiere a plantas de porte arbóreo que viven en zonas en las que el nivel freático está cerca de la superficie (tarajes, chopos, sauces).

Para realizar una descripción general de la vegetación de estas lagunas, se han descrito 5 comunidades - tipo, de manera que cada sistema en particular tendrá todas o algunas de estas comunidades, y en cada sistema una de ellas es dominante, o más abundante, frente a las demás.

1. Vegetación de ribera o rambla: Estas comunidades (figura 2.17.; 2) están compuestas por plantas de las anteriormente denominadas freatofitas, ya que es la humedad del suelo el factor fundamental para que se produzca su desarrollo. Este tipo de vegetación está presente en todas las lagunas estudiadas, incluso en las que están más degradadas, como es el caso de la laguna Redonda de Campillos. En las lagunas del Guadalhorce, al estar asociadas al cauce de un río importante, es donde se encuentra mayor diversidad de este tipo de vegetación, ya que hay sauces (*Salix sp*), álamos (*Populus alba*), fresnos (*Fraxinus sp*) y eucaliptus (*Eucalyptus sp*), que no aparecen en ningún otro de los sistemas estudiados. El taraje o taray (*Tamarix africana*, *Tamarix canariensis*) sí es una planta común en estos ecosistemas, tanto en el Guadalhorce como en Fuente de Piedra, o Campillos; en ocasiones los tarajes ó tamarindos pueden llegar a

tener porte arbóreo, como en la laguna de Capacete, y tienen la capacidad de colonizar con rapidez sistemas degradados, como ocurrió en la laguna Redonda entre 1997 y 2001 (figura 2.18.).

Junto a estas especies, y asociadas más directamente con las orillas de las laguna, se encuentran los helófitos: juncos (*Juncus sp*; *Scirpus maritimus*), enneas (*Typha angustifolia*) y carrizos (*Phragmites communis*), que son muy comunes en todas las lagunas, tanto en las albuferas de Adra como en la desembocadura del Guadalhorce, donde también aparece la caña (*Aroundo donax*), o en Campillos, donde pueden llegar a colonizar todo el vaso lacustre, como en la laguna de Camuñas. En la laguna Dulce abunda el carrizo (figura 2.17.; 2)

2. Vegetación halófito: Su presencia se asocia a suelos con altas concentraciones de sales. Estas comunidades suelen ser de pequeño porte, de tipo herbáceo o subarborescente, y pertenecen a la familia Quenopodiaceae. Entre los géneros más característicos se encuentran *Arthrocnemum* (figura 2.17.; 3), *Suaeda* o *Salicornia*. Estas comunidades están bien representadas en la laguna de Fuente de Piedra, en la desembocadura del Guadalhorce y en las lagunas Dulce y Capacete de Campillos. No se encuentran, por el contrario, en las albuferas de Adra, en las lagunas de Archidona ni en las de Antequera, debido a la baja salinidad de los suelos.

3. Vegetación acuática: La vegetación acuática (figura 2.17.; A) está fuertemente condicionada por la salinidad del agua y la profundidad de la cubeta. Se diferencian, como ya se ha comentado, los anfifitos, que en el caso de las lagunas estudiadas sólo se localizan en las lagunas de Caja y Viso, debido a la baja salinidad de sus aguas (figura 2.17.; C); y los limnófitos, completamente sumergidos. En Fuente de Piedra predomina una especie de fanerógama, la *Ruppia drepanensis* (figura 2.17.; A), que tapiza la práctica totalidad de la cubeta durante la estación de crecimiento austral (julio - noviembre), salvo en las zonas con elevada turbidez del agua, como lo es la de nidificación de los flamencos (García Jiménez, 1991). También hay *Ruppia* en la laguna Dulce, Salada, Cerero de Campillos, y la Ratosa, mientras que en las albuferas de Adra ha predominado *Najas marina* (figura 2.19.) durante el año 2000, si bien en épocas anteriores la especie dominante ha sido *Potamogetum pectinatum* (IEA., 1990). Otros géneros de vegetación limnófito los constituyen la *Chara*, en las lagunas Dulce, Salada y Guadalhorce y la *Althemia*, en las lagunas Dulce, Salada y Fuente de Piedra.

4. Vegetación antropizada: La vegetación que domina en todas las zonas húmedas estudiadas en este trabajo, es la vegetación de cultivo (figura 2.17.; 4 y 5): olivo, cereales y girasoles en la zona de Antequera, cultivos bajo plástico en Adra y caña de azúcar y remolacha en la desembocadura del Guadalhorce.

Otro tipo de vegetación que se puede considerar antropizada es la asociada a escombreras, que se pueden encontrar en la desembocadura del Guadalhorce, así como en Adra y en algunas lagunas de Campillos, concretamente en la laguna Salada, Redonda y Lobón. Son comunidades en las que destacan los cardizales, que pueden ser de porte alto (géneros *Onopordum* y *Silybum*) y gramíneas con especies del género *Poa*.

5. Matorral: La comunidad de matorral se encuentra en el sector de Fuente de Piedra, Campillos y la Ratosa muy degradada, y su presencia está restringida a las lindes de los caminos o a lugares poco antropizados, como la cuenca de drenaje de la



Figura 2.18. Laguna Redonda de Campillos, en 1997 (arriba), en febrero de 1998 (centro) y en 2001, colonizada por tarays (abajo)

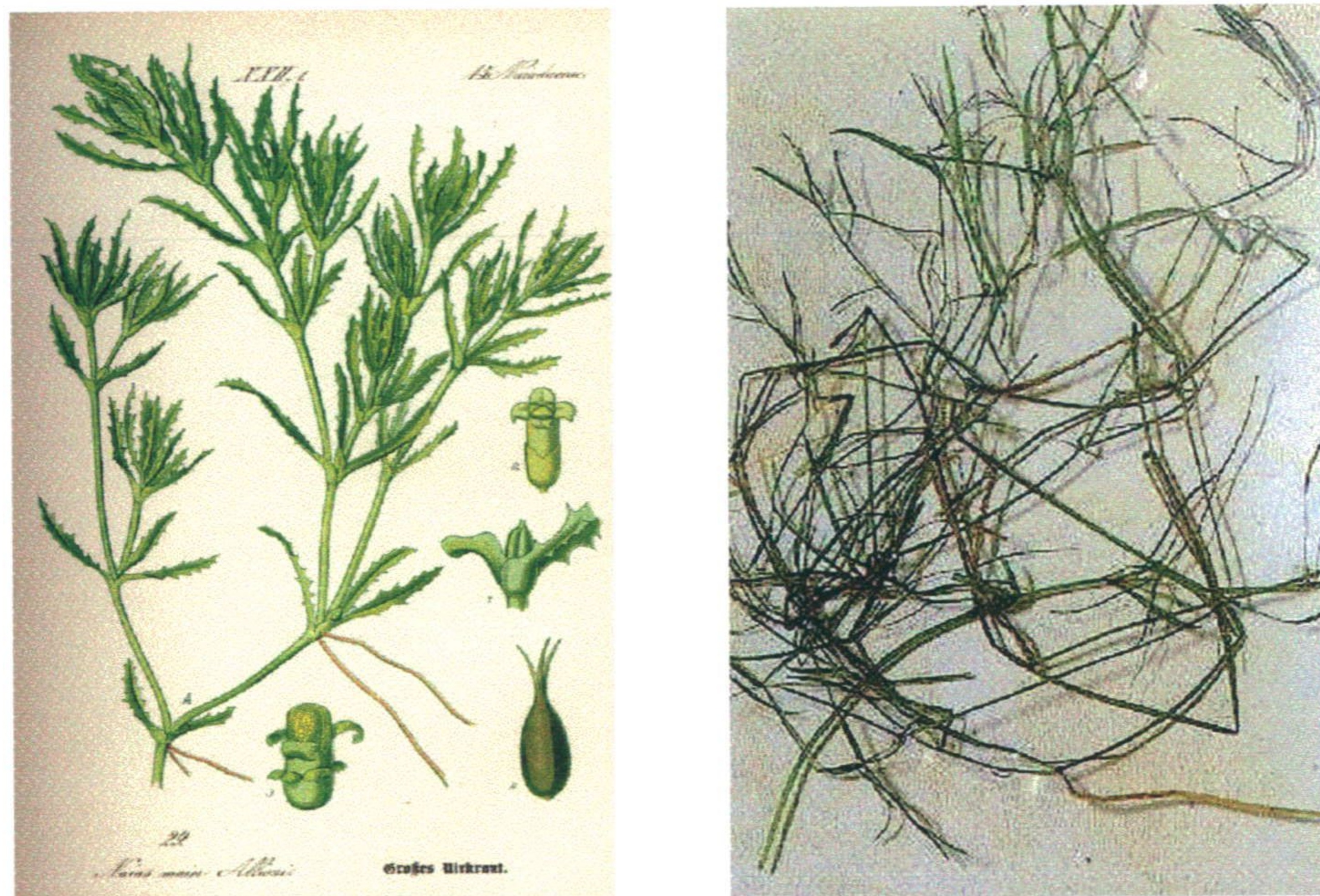


Figura 2.19. *Najas marina* (izquierda) y *Potamogetum pectinatum* (derecha)

laguna de Camuñas. Las especies características son *Rosmarinus officinalis* (romero), *Cistus albidus* (jara), *Thymus zygys* (tomillo) o *Genista umbellata* (jaramago) (figura 2.17; 3). En las lagunas de Archidona y Antequera, sin embargo, este tipo de vegetación es abundante y predominan, aparte de las ya mencionadas, especies como la *Retama sphaeocarpa* (retama) y el *Quercus rotundifolia* (encina).

2.6. Usos del territorio

En la depresión de Antequera, en la cual se sitúan la mayoría de las lagunas continentales incluidas en el estudio, predomina una morfología poco accidentada, con relieves poco pronunciados, con cultivos de secano (olivo y cereal), si bien el regadío se está implantando progresivamente (13% de la superficie, PORN, 1997). La depresión de Antequera constituye una unidad territorial y económica, y un lugar estratégico que une el valle del Guadalquivir con el levante a través de la vega de Granada y las hoyas de Guadix y Baza; presenta, además, una situación central respecto a las provincias limítrofes de Córdoba, Cádiz, Sevilla y Granada. Está dividida en tres subsectores; Antequera, Campillos y Archidona. Estos tres municipios asumen funciones centrales hasta un nivel en el que los servicios se concentran en Antequera. Además, existen municipios de menor tamaño como Fuente de Piedra, Humilladero, Mollina, Alameda, Sierra de Yeguas y Teba, entre otros .

Las principales obras de infraestructura hidráulica de la zona norte de la provincia de Málaga están localizadas en los municipios de Teba, Ardales y Campillos, y las constituyen cuatro embalses: Guadalhorce, Conde de Guadalhorce, Guadalteba y Gaitanejo. Los de mayor capacidad son los del Guadalhorce (135 hm³, 1973) y Guadalteba (150 hm³, 1972).

Predominan las actividades agrarias, si bien la posición estratégica de la comarca favorece la instalación de pequeñas industrias agroalimentarias y de derivados de la piel y el cuero. En el entorno inmediato de las lagunas de Campillos predomina el cereal, en Fuente de Piedra y la Ratosa el olivo, en Caja y Viso una extensa plantación de nogales. En las lagunas de Archidona no hay cultivos cercanos, y una fábrica de yesos es la industria más cercana. Algunas lagunas, como las de Camuñas y Salada de Campillos, han sido drenadas con fines agrícolas. Hay también pastoreo itinerante de cabaña ovina y caprina, así como aprovechamiento cinegético de caza menor (conejo, liebre, zorro y perdiz). Fuera de la zona de protección, al menos en Campillos, hay explotaciones porcinas de uso intensivo, una de las cuales se sitúa muy cerca de la laguna de Capacete; esta fábrica estuvo vertiendo purines a la laguna hasta su declaración como zona protegida.

El uso público de las zonas protegidas está restringido y la proximidad de estas lagunas a núcleos de población (Campillos, Fuente de Piedra, Salinas) ha dado lugar a que en algunos casos hayan sido utilizadas para el vertido de escombros y basuras, como ha sido el caso de la laguna Redonda de Campillos hasta que comenzó su restauración en el año 2000.

Las lagunas costeras, Guadalhorce y Adra, también están rodeadas de cultivos. En el complejo lagunar de la desembocadura del río Guadalhorce, situado entre los polígonos industriales y el aeropuerto, la pequeña franja de terreno que aún conserva su uso agrícola está constituida por parcelas de reducidas dimensiones; el cultivo predominante era la caña de azúcar hasta que se produjo el cierre de la fábrica de azúcar, lo que provocó una reducción del 50 % de la superficie de cultivo entre 1991 y

1994 (de 1200 a 600 ha aproximadamente). Este cultivo está siendo sustituido mayoritariamente por alcachofa.

En las albuferas de Adra, los cultivos son, como se ha comentado anteriormente, bajo plástico (pepinos, tomates, melones, etc.).

3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS LAGUNAS

3.1. Morfometría

3.1.1. Metodología

La caracterización morfométrica de las lagunas estudiadas se ha realizado digitalizando los mapas batimétricos de las lagunas en las que ya existía una batimetría de detalle realizada con anterioridad (Fuente de Piedra y las albuferas de Adra) y, en las restantes lagunas, se han elaborado estos mapas en campo realizando transectos perpendiculares al eje mayor de cada laguna y midiendo la profundidad con una sonda de conductividad y temperatura marca WTW, modelo LF 196. Estos mapas se realizaron en épocas de máxima inundación, con el objeto de obtener los volúmenes y áreas máximos y poder realizar las curvas hipsográficas. El complejo lagunar de la desembocadura del Guadalhorce no se incluye en este apartado debido a que las obras de adecuación del curso bajo de dicho río modificarán sustancialmente la morfología de las cubetas, e incluso algunas serán drenadas. La digitalización de las cuencas se ha llevado a cabo con el programa Surfer 7.0 ® de la casa Golden Software, y con él se han calculado los volúmenes de agua almacenada y las áreas a diferentes profundidades. En la tabla 3.1. se muestran algunas características e índices morfométricos de las lagunas estudiadas, que han sido estimados utilizando el método de Hutchinson (1957).

3.1.2. Morfometría de las lagunas estudiadas

En la mayoría de las lagunas que se incluyen en este estudio la relación entre el volumen y el área inundada, expresado como profundidad media, z_m , es menor de 1.5 m, se trata, por tanto, de lagunas muy poco profundas en general; sin embargo, en las lagunas Grande y Chica, dicha relación presenta unos valores algo superiores, de 5.9 m y 2.9 m, respectivamente (tabla 3.1.). Los otros dos sistemas que presentan profundidades medias mayores de 1.5 m son la albufera Nueva (2.3 m) y laguna de Fuente de Piedra (2.4 m); en este último caso los valores obtenidos son similares a los calculados previamente para este sistema por García Jiménez (1991). La laguna Grande de Archidona con 13 m, y la de Viso con 1.3 m, son las que tienen una profundidad máxima mayor y menor, respectivamente. El resto de las lagunas tienen profundidades máximas en un rango entre 2 y 4 m, salvo la laguna Chica, cuya profundidad máxima es de 8.3 m. Los valores morfométricos de las albuferas de Adra obtenidos con anterioridad (IEA, 1990; Fabián, 2002) son similares a los que se han calculado en este trabajo.

3.1.3. Relación de algunos parámetros morfométricos con la dinámica de las lagunas

En las curvas hipsográficas (figura 3.1. I y II) se aprecia una clara diferencia entre las lagunas Grande y Chica de Archidona y el resto, debido al hecho de que las pendientes de las paredes de las cubetas son mayores al estar condicionadas por procesos de colapso; en efecto como ya se mencionó anteriormente, las lagunas de Archidona están asociadas a dolinas de hundimiento.

desarrollo del volumen (D_v), son una nueva indicación de la poca profundidad de estas lagunas, que se puede apreciar en las figuras 3.2. I y II. Estos valores son similares a los de grandes lagos con orígenes muy diferentes a los de estas lagunas; por ejemplo, en el lago de Sanabria, de origen glacial (Hoyos - Alonso, 1996), $z_m/z_{máx} = 0.53$, y $D_v = 1.58$. En el caso de las lagunas estudiadas, son la Nueva, Fuente de Piedra y Ratosa las que, debido a su gran superficie, sobre todo en el caso de Fuente de Piedra presentan mayores índices.

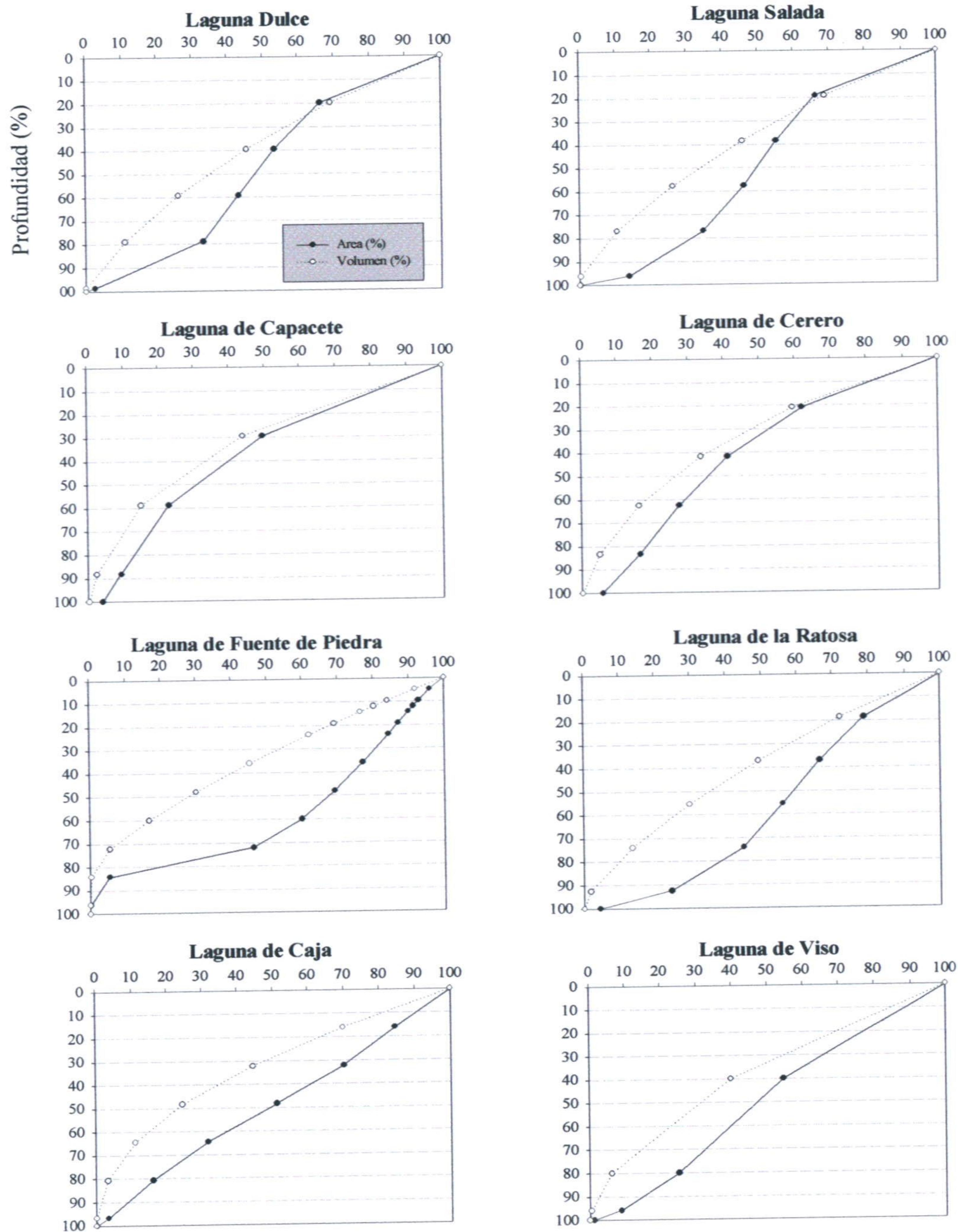


Figura 3.1. (I) Curvas hipsográficas de los sistemas estudiados: porcentaje de área y de volumen en función de la profundidad (%)

	GRANDE	CHICA	DULCE	SALADA	CAPACETE	CERERO	RATOSA
Area del Lago: A (m ²)	96784.5	80261.6	785469	186942	138853	68910	363986
Longitud máxima: L _{máx} (m)	455	525	1050	560	550	375	900
Longitud de la línea de costa: L (m)	1350	1325	3487.5	1800	1550	1000	2500
Profundidad máxima: z _{máx} (m)	13.2	8.3	2.6	2.6	1.8	2.4	2.7
Volumen del lago: V (m ³)	567613	229104	982022	242399	85808	67522	573895
Area de la cuenca: A _c (m ²)	146794	179893	1047000	726000	252000	281000	3330307
Anchura media: B _m =A/L _{máx} (m)	212.7	152.9	748.1	333.8	252.5	183.8	404.4
Profundidad media: z _m =V/A (m)	5.9	2.9	1.3	1.3	0.6	1.0	1.6
Profundidad relativa: Z _r =50* z _{máx} /(A*π) ^{1/2} (%)	3.8	2.6	0.3	0.5	0.4	0.8	0.4
Desarrollo de la línea de costa: D _L =L/2 (A*π) ^{1/2} (adim.)	1.2	1.3	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2
Desarrollo del volumen: D _v =3*z _m /z _{máx} (adim.)	1.3	1.0	1.4	1.5	1.0	1.2	1.8
z _m /z _{máx} (adim.)	0.4	0.3	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6
A _c /A (adim.)	1.5	2.2	1.3	3.9	1.8	4.1	9.1
A _c /V (m ⁻¹)	0.3	0.8	4.6	3.0	2.9	4.2	5.8

Tabla 3.1 Características morfométricas de las lagunas estudiadas (I)

Otro dato que puede obtenerse de estas curvas hipsográficas es la profundidad aproximada a partir de la cual comienzan a ser importantes las interacciones entre el agua y el sedimento. Si se toma como referencia el 20% del área (el punto a partir del cual la interacción con el sedimento es significativa), se observa como esa profundidad es diferente en cada una de las lagunas, con una notable disparidad entre las lagunas de Archidona, en las cuales esta profundidad es de 4 m en la Chica y de 10 m en la Grande, y las restantes, donde en ningún caso se superan los 2 m.

Aspectos tales como el balance térmico o el balance de nutrientes están muy relacionados con el volumen de cada capa de agua; sobre todo en lagunas en las que se establecen regímenes de estratificación apreciable como son las lagunas Grande y Chica.

	CAJA	VISO	FUENTEPIEDRA	HONDA	NUEVA
Area del Lago: A (m ²)	101120	88725	11538943	93753	270768
Longitud máxima: L _{máx} (m)	450	470	7200	586	759
Longitud de la línea de costa: L (m)	1200	1375	17000	1466	2066
Profundidad máxima: z _{máx} (m)	3.1	1.3	4.1	3.19	3.8
Volumen del lago: V (m ³)	154392	53007	27835391	117883	627116
Area de la cuenca: A _c (m ²)	1035916	525725	152300000	18000000	500000
Anchura media: B _m =A/L _{máx} (m)	224.7	188.8	1602.6	160.0	356.7
Profundidad media: z _m =V/A (m)	1.5	0.6	2.4	1.3	2.3
Profundidad relativa: Z _r =50* z _{máx} /(A*π) ^{1/2} (%)	0.9	0.4	0.1	0.9	0.6
Desarrollo de la línea de costa: D _L =L/2 (A*π) ^{1/2} (adim.)	1.1	1.3	1.4	1.4	1.1
Desarrollo del volumen: D _v =3*z _m /z _{máx} (adim.)	1.5	1.4	1.8	1.2	1.8
z _m /z _{máx} (adim.)	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6
A _c /A (adim.)	10.2	5.9	13.2	192.0	1.8
A _c /V (m ⁻¹)	6.7	9.9	5.5	152.7	0.8

Tabla 3.1 Características morfométricas de las lagunas estudiadas (II)

El desarrollo de la línea de costa (D_L) indica el efecto potencial de los procesos litorales sobre el lago: a mayor índice, mayor efecto; las lagunas estudiadas no presentan índices muy elevados, los mayores los presentan la laguna de Fuente de Piedra y la albufera Honda, debido a sus contornos arriñonados.

Los relativamente altos valores de z_m/z_{máx}, que están comprendidos entre 0.3 (Capacete y Chica) y 0.6 (Nueva, Fuente de Piedra y Ratosa), junto con los valores del

En la figura 3.3. se puede apreciar la batimetría de 13 de los sistemas estudiados. La profundidad relativa (Z_r) es la "profundidad máxima expresada como un porcentaje del diámetro de un círculo cuya área es coincidente con la del lago" (Hutchinson, 1957). Este es uno de los índices que resultan más interesantes para comparar la diferente susceptibilidad de las lagunas a ser influidas, en cuanto a la estabilidad de la columna de agua se refiere, por factores externos. Es la relación entre el área del lago, entrada de la

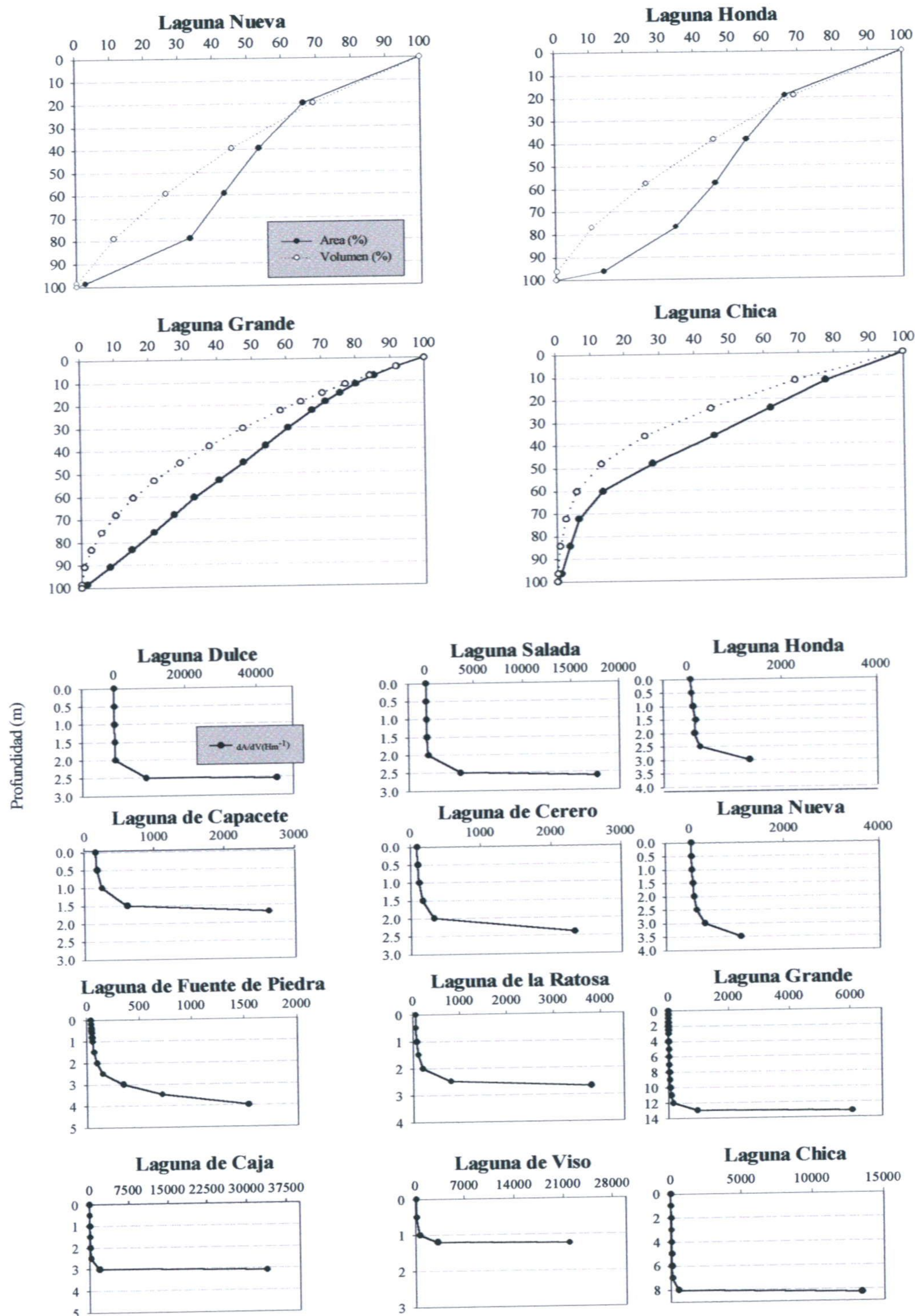


Figura 3.1. (II) Curvas hipsográficas de los sistemas estudiados: porcentaje de área y de volumen en función de la profundidad (%); también se incluye la relación Área / Volumen (Hm^{-1}) en función de la profundidad (m)

principal energía externa que recibe todo sistema acuático (la solar) y la profundidad que indica el eje a través del cual se disipa esta energía. En la mayoría de los lagos, este índice, expresado como un porcentaje, es superior al 1%. En el lago de Sanabria (Hoyos - Alonso, 1996) es del 2.4 %, aunque hay lagos en los que se pueden alcanzar valores muy superiores, como en el lago Redó (pirineos), en el que se alcanza el 13 % (Catalán, 1987). Para las lagunas estudiadas el índice está comprendido entre 3.8 % y 0.1% en este orden:

Grande > Chica > Caja = Honda > Cerero > Nueva > Salada > Capacete = Ratosa = Viso > Dulce > Fuente de Piedra.

Las mayores diferencias en el valor de este índice se han obtenido entre las dos primeras y las ocho restantes, lo que explica los fuertes contrastes observados, en lo que se refiere a la estabilidad de la columna de agua, entre las lagunas de Archidona, con una estratificación térmica apreciable en determinadas épocas del año, y las demás, influidas fundamentalmente por los vientos dominantes, que mezclan las aguas y homogeneizan así las características físico - químicas de las mismas durante el año. Este índice tiene también una gran importancia en la dinámica biológica de los lagos (Catalán, 1987).

El valor de A_c/A indica que las cuencas de las lagunas de Campillos (Dulce, Salada, Capacete y Cerero) son pequeñas en relación con el área de máxima inundación. Es la laguna Dulce la que presenta el menor valor de esta relación ($A_c/A = 1.3$), lo que explica su comportamiento hidrológico diferenciado del resto de las lagunas de Campillos, puesto que se seca en periodos durante los cuales el resto de las lagunas siguen almacenando agua. El índice de la laguna de Capacete ($A_c/A = 1.8$) no está calculado correctamente, ya que su cuenca vertiente ha sido modificada antrópicamente: en la laguna existe una acequia que la une a otra pequeña zona encharcadiza, la laguna de Camuñas, que aporta agua a la primera, con lo cual su cuenca se uniría a la de Capacete, y el índice A_c/A sería en realidad mayor. Las dos lagunas de Antequera presentan valores muy diferentes de este índice: 10.2 en Caja y 5.9 en Viso. Al ser la cuenca de la laguna de Caja mayor que la de Viso, la primera almacena más volumen de agua y, por tanto, su profundidad máxima y relativa son mayores. Cabría pensar que la salinidad debería ser mayor en Viso que en Caja pero no ocurre así y, de hecho, en la primera la salinidad es aproximadamente la mitad que en la segunda. Una posible explicación a este fenómeno podría estar relacionada con los periodos de sequía más prolongados que sufre la laguna de Viso en relación con la de Caja; durante estos periodos las costras salinas que se forman al secarse la laguna deben experimentar deflación eólica, que es principal mecanismo por el que se produce una salida efectiva de sales del sistema. La albufera Honda es la que presenta el mayor valor de la relación A_c/A , seguida por la laguna de Fuente de Piedra. En el primer caso se trata de un sistema al que llegan ramblas procedentes del borde suroccidental de la Sierra de Gádor y su cuenca es, por tanto, mucho más extensa que la del resto de lagunas estudiadas. En el caso de las lagunas de Archidona, debido a que representan en realidad dolinas de hundimiento (Pezzi, 1977), sus cuencas son de reducidas dimensiones y, por tanto, el valor de la relación A_c/A resulta ser pequeño: en la laguna Grande $A_c/A = 1.5$.

Por último, el índice A_c/V , que relaciona el área de la cuenca con el volumen de agua del lago, tiene que ver de forma un tanto aproximada, ya que en él no se contemplan factores tales como la litología, el tipo de suelos o las pendiente, con el estado trófico de las lagunas: el aporte externo de nutrientes desde la superficie de la cuenca hacia el lago está influido por este índice en el sentido de que, cuanto menor es su valor, más oligotrófica es la laguna (Hoyos - Alonso, 1996).

Existe una marcada diferencia entre los valores de este índice en las lagunas Grande y Chica y en el resto de las lagunas: es menor de uno en las primeras y mayor en las demás ($A_c/V = 9.9 \text{ m}^{-1}$ en la laguna de Viso). Según este índice, las lagunas estudiadas son eutróficas, si bien se trata en parte de una eutrofización natural debida a la abundancia de rocas evaporíticas en las cuencas endorreicas en que se encuentran las lagunas. En el caso de las lagunas de Archidona, el valor de este índice es de $A_c/V = 0.3 \text{ m}^{-1}$ en la Grande y 0.8 m^{-1} en la Chica; estos valores no han de considerarse excepcionalmente bajos ya que hay lagos, como el Garda (Italia), en los que $A_c/V = 0.05 \text{ m}^{-1}$.

En las albuferas de Adra los valores de A_c/A difieren mucho ya que, de ambas albuferas, sólo la albufera Honda recibe aportes superficiales de ramblas. Se cumple que el sistema hipereutrófico es el que presenta un valor más elevado de este índice, la albufera Honda (152 m^{-1}), mientras que la albufera Nueva (0.8 m^{-1}) es un sistema eutrófico.

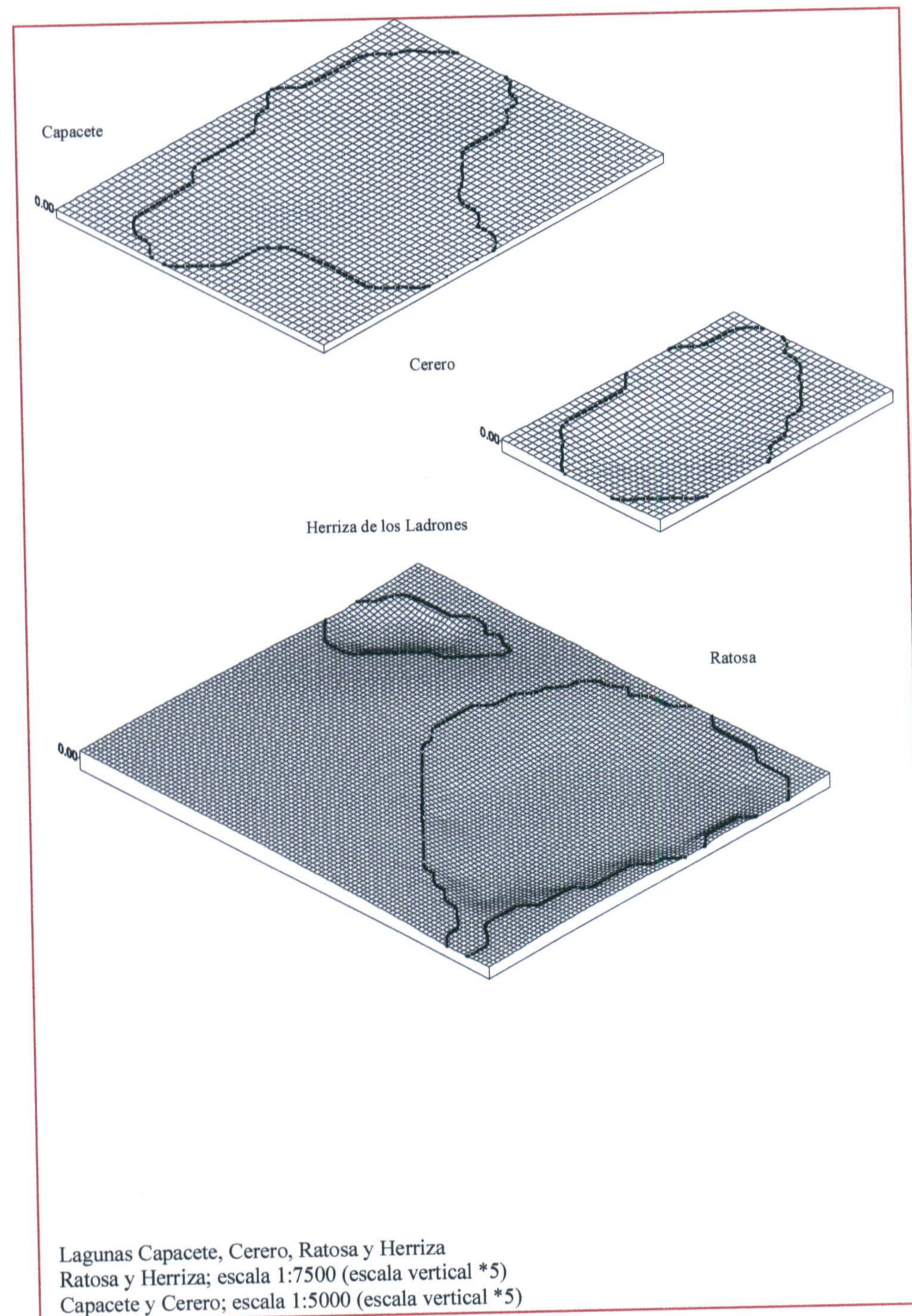
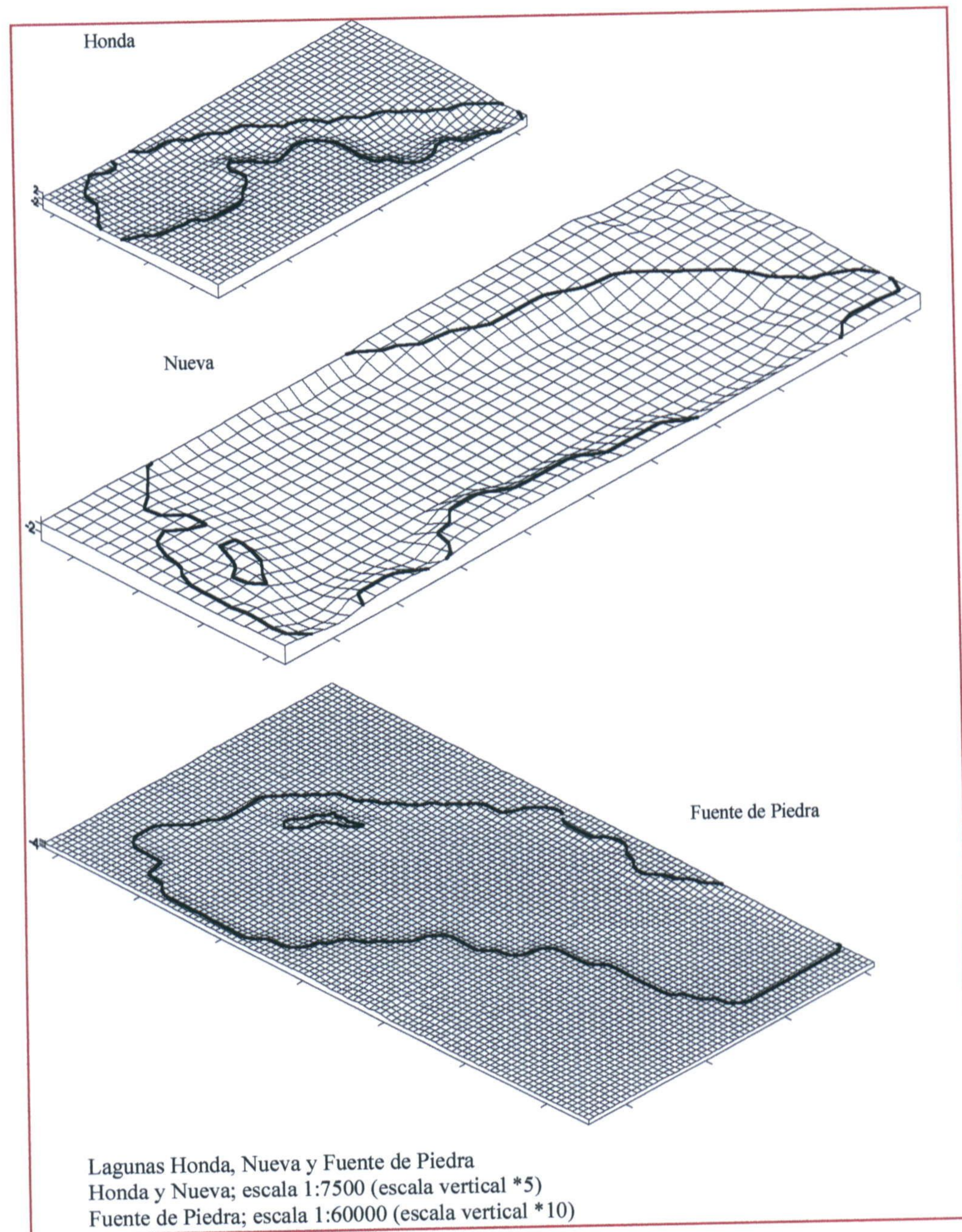


Figura 3.2.(I) Morfometría de algunas de las lagunas estudiadas

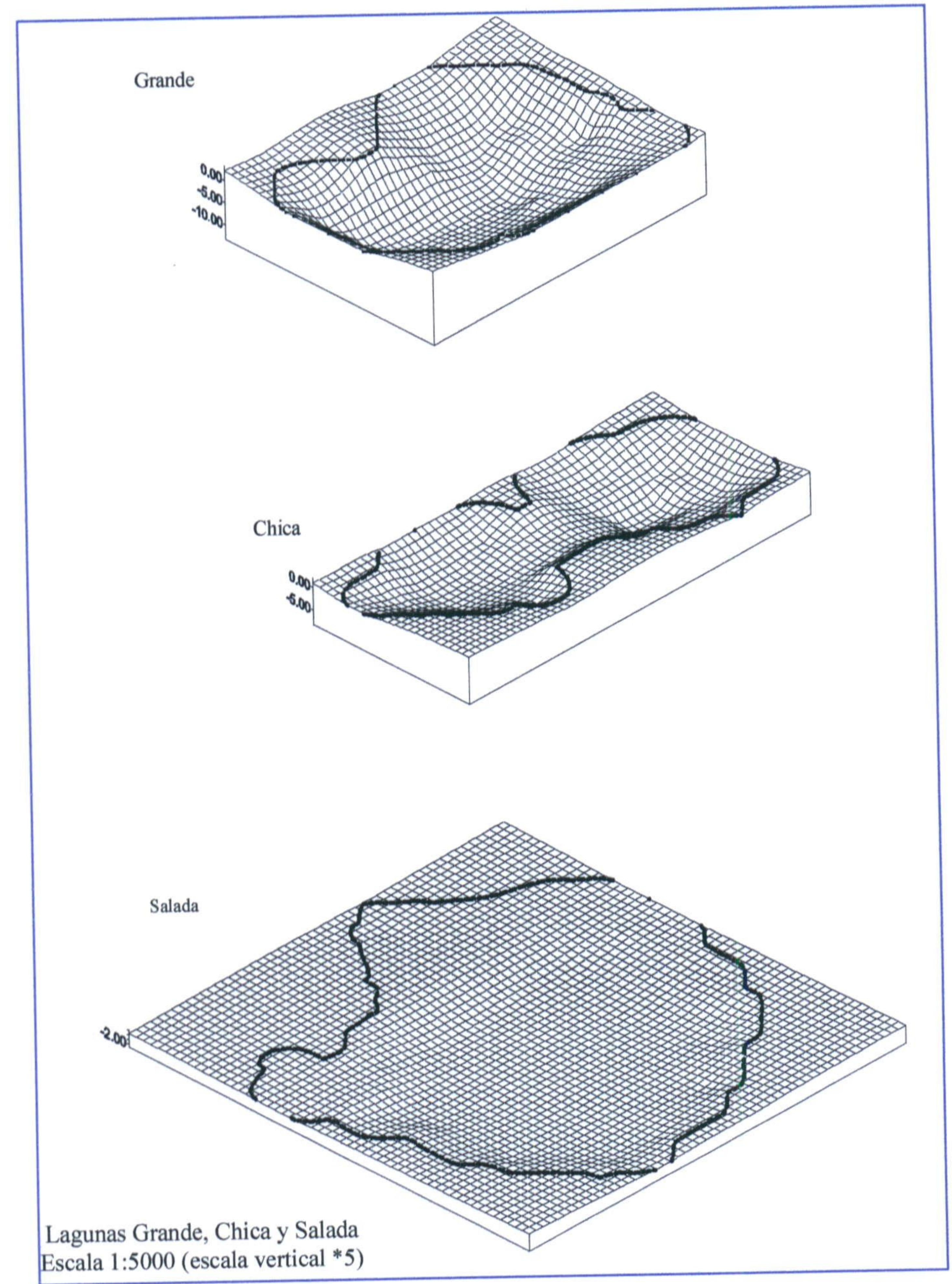
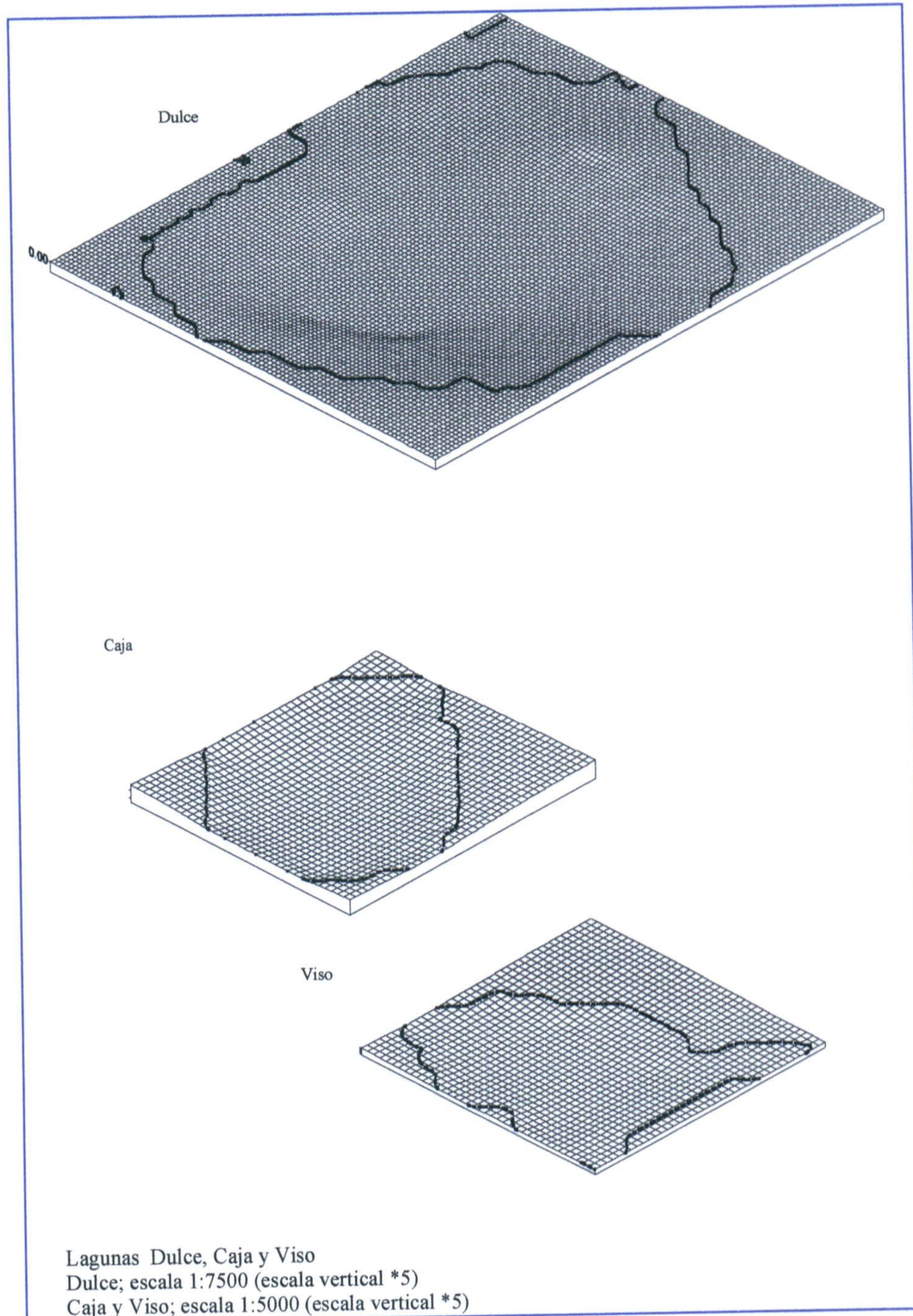


Figura 3.2.(II) Morfometría de algunas de las lagunas estudiadas

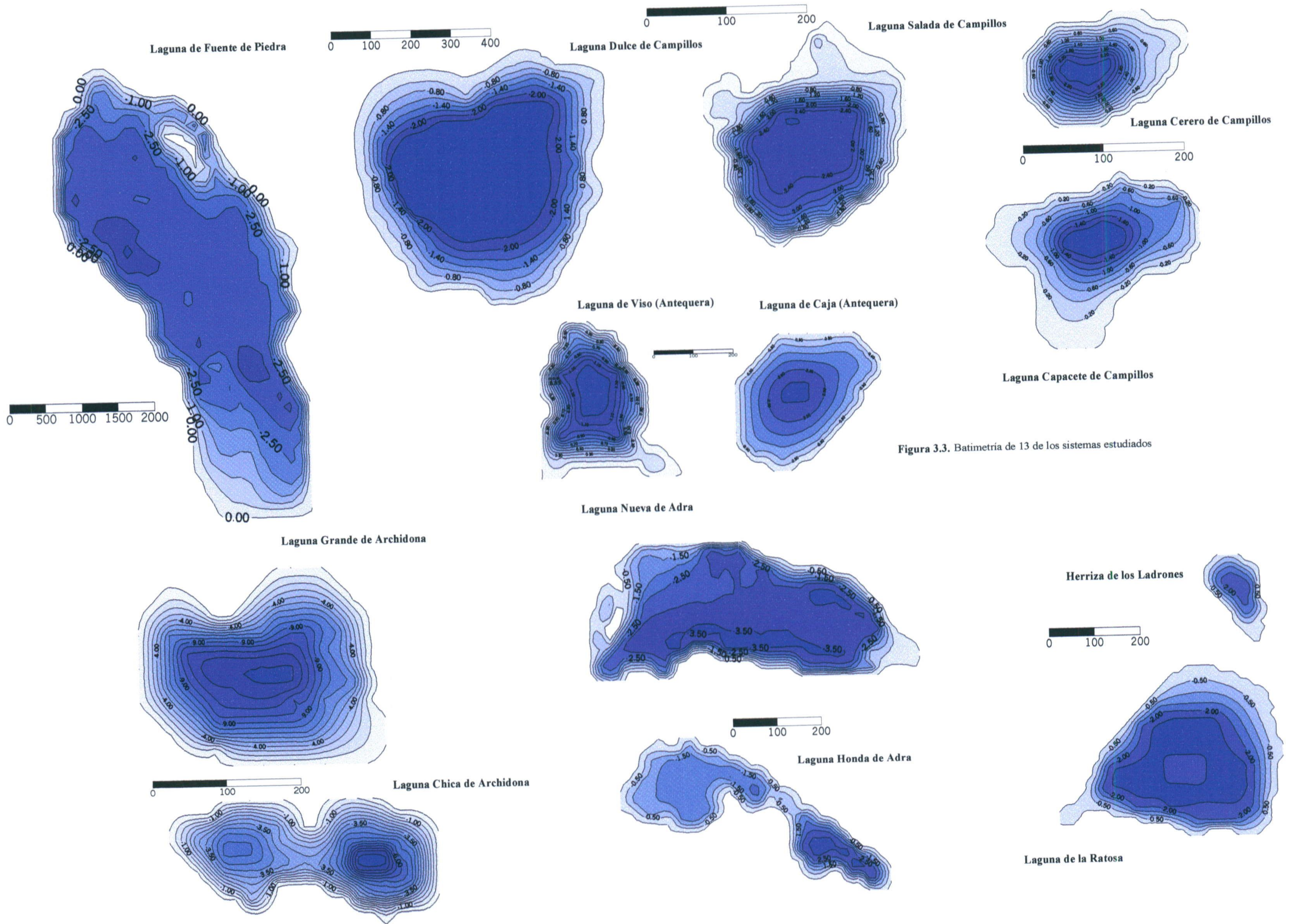


Figura 3.3. Batimetría de 13 de los sistemas estudiados

3.2. Hidrología

3.2.1. Metodología

Se han controlado niveles de agua superficial y subterránea en las lagunas estudiadas y en pozos y piezómetros cercanos a la orilla de aquéllas. Las medidas de niveles piezométricos se han realizado con sondas eléctricas de la casa SEBA Hidrologie. En el caso de las albuferas de Adra, se ha llevado a cabo, además, una nivelación relativa de las bocas de los piezómetros someros del entorno inmediato de las albuferas y de los topes de las escalas limnimétricas instaladas en cada laguna. En la serie de hitos nivelados se han incluido los brocales de dos pozos abiertos, situados unos 400 m al oeste de cada laguna. Estos pozos forman parte de una red piezométrica del acuífero del delta del río Adra, que viene siendo controlada regularmente desde hace años por el Servicio de Hidrología Subterránea de la Comisaría de Aguas del Sur de España (CASE).

Se han realizado balances hídricos de diferentes periodos de las lagunas de Fuente de Piedra, Ratosa, Campillos y de las albuferas de Adra. Dado que estos sistemas presentan características diferentes, los métodos utilizados para la realización del balance han variado para el cálculo de las aportaciones superficiales de las correspondientes cuencas vertientes; en todos los casos, la incógnita del balance ha sido el flujo subterráneo (G). Esta variables está inevitablemente afectada por el error de cierre del balance, esto es, por la suma algebraica de todos los errores cometidos en la determinación de todas y cada una de las restantes variables.

En el caso de las lagunas de Campillos y la Ratosa, el flujo subterráneo (G: positivo o negativo según se produzca hacia o a partir de las mismas, respectivamente) se ha estimado mediante la ecuación del balance hídrico:

$$\text{Entradas (E)} = \text{Salidas (S)} \pm \text{Variación de Almacenamiento (VA)}$$

Las entradas corresponden a la precipitación directa sobre las lagunas (EP), la escorrentía superficial hacia las mismas procedente de las cuencas vertientes (EQ) y las aportaciones subterráneas (ES). Las salidas son la evaporación (SEv) y las relacionadas con el flujo subterráneo desde las lagunas hacia los materiales de su entorno (SS), pues no existen efluentes superficiales en las lagunas estudiadas (SQ = 0). La ecuación del balance hídrico puede expresarse entonces, para un periodo de tiempo determinado, como:

$$EP + EQ + ES = (SEv + SS) \pm VA$$

El flujo subterráneo neto en relación con la laguna puede obtenerse a partir de la ecuación anterior:

$$G = ES - SS = SEv - (EP + EQ) \pm VA$$

Hay que tener en cuenta que, al aplicar la citada expresión, los valores positivos de G son equivalentes a entradas subterráneas netas hacia la laguna, mientras que los negativos indicarían el flujo desde la laguna hacia los materiales permeables de su entorno, según se ha apuntado anteriormente. Los cálculos se han realizado a escala mensual. La precipitación corresponde a la registrada en la estación de Campillos, situada a una altitud de 460 m, en la inmediata proximidad de las lagunas consideradas. Los datos proceden del Servicio de Hidrología de la Confederación Hidrográfica del Sur de España. La escorrentía superficial generada en las cuencas vertientes, y que se supone que alcanza finalmente a las lagunas correspondientes, se ha estimado por el método denominado del “número de curva”, desarrollado por el Servicio de

Conservación de Suelos norteamericano (Chow *et al.*, 1994). Este método ha sido aplicado a las lagunas del sur de la provincia de Córdoba (Moya *et al.*, 1988). El trabajo de Linares (1990) describe otro método para calcular la escorrentía mensual en la cuenca de Fuente de Piedra a partir de los valores de precipitación y de evapotranspiración (estimada mediante la fórmula de Thornthwaite y un balance de agua en el suelo), y de unos coeficientes empíricos. Almécija (1997) aplicó ambos métodos en dicho sector durante el periodo 1989-1994 y obtuvo resultados semejantes.

Los datos de evaporación se midieron en un tanque normalizado de clase A, situado en el Cerro del Palo, en la inmediata proximidad de la laguna de Fuente de Piedra, y han sido facilitados por el Patronato de dicha Reserva Natural. Estos datos, y los de precipitación, corresponden a medidas diarias totalizadas mensualmente. En cualquier caso, para la estimación de la escorrentía superficial por el método seleccionado es necesario disponer de datos diarios, si bien los resultados se han totalizado igualmente a escala mensual. Las variaciones de almacenamiento se obtienen a partir de las observaciones limnimétricas (altura de la lámina libre sobre el fondo de las lagunas) y de la superficie máxima inundable de cada una de ellas, supuesta estable. Estos datos corresponden a medidas semanales, aunque para este estudio se han considerado las variaciones mensuales, según se ha dicho. Algunas observaciones de nivel que faltaban en las lagunas de Capacete y Cerero se han completado por regresión lineal con los datos de la laguna Salada, con los que muestran una alta correlación.

El método utilizado en la laguna de Fuente de Piedra ha sido similar, si bien en este caso existen arroyos que aportan un cierto caudal a la laguna. Este caudal se ha

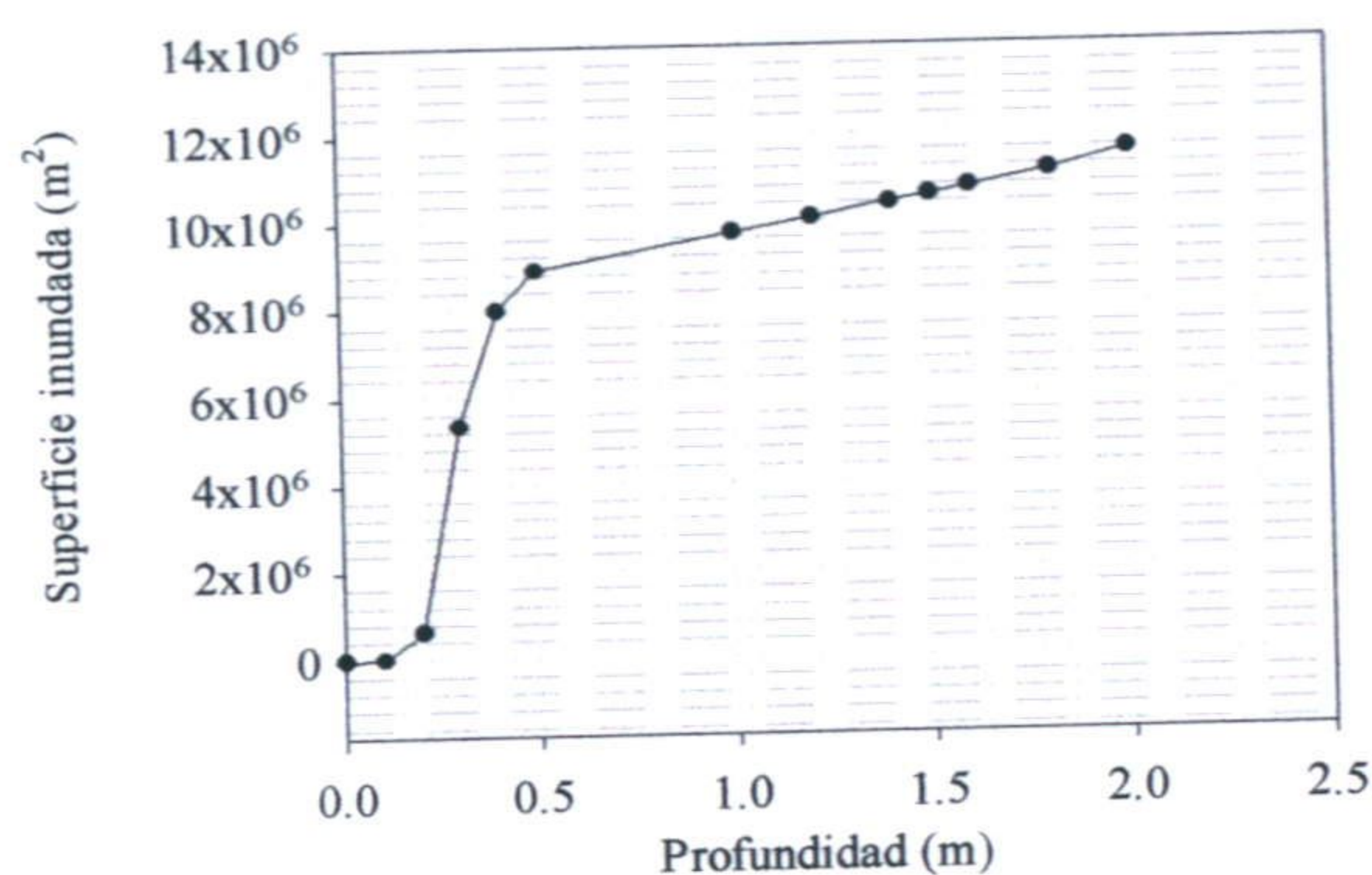


Figura 3.4. Variación de la superficie inundada en función de la altura de la lámina de agua considerada en la realización del balance hídrico

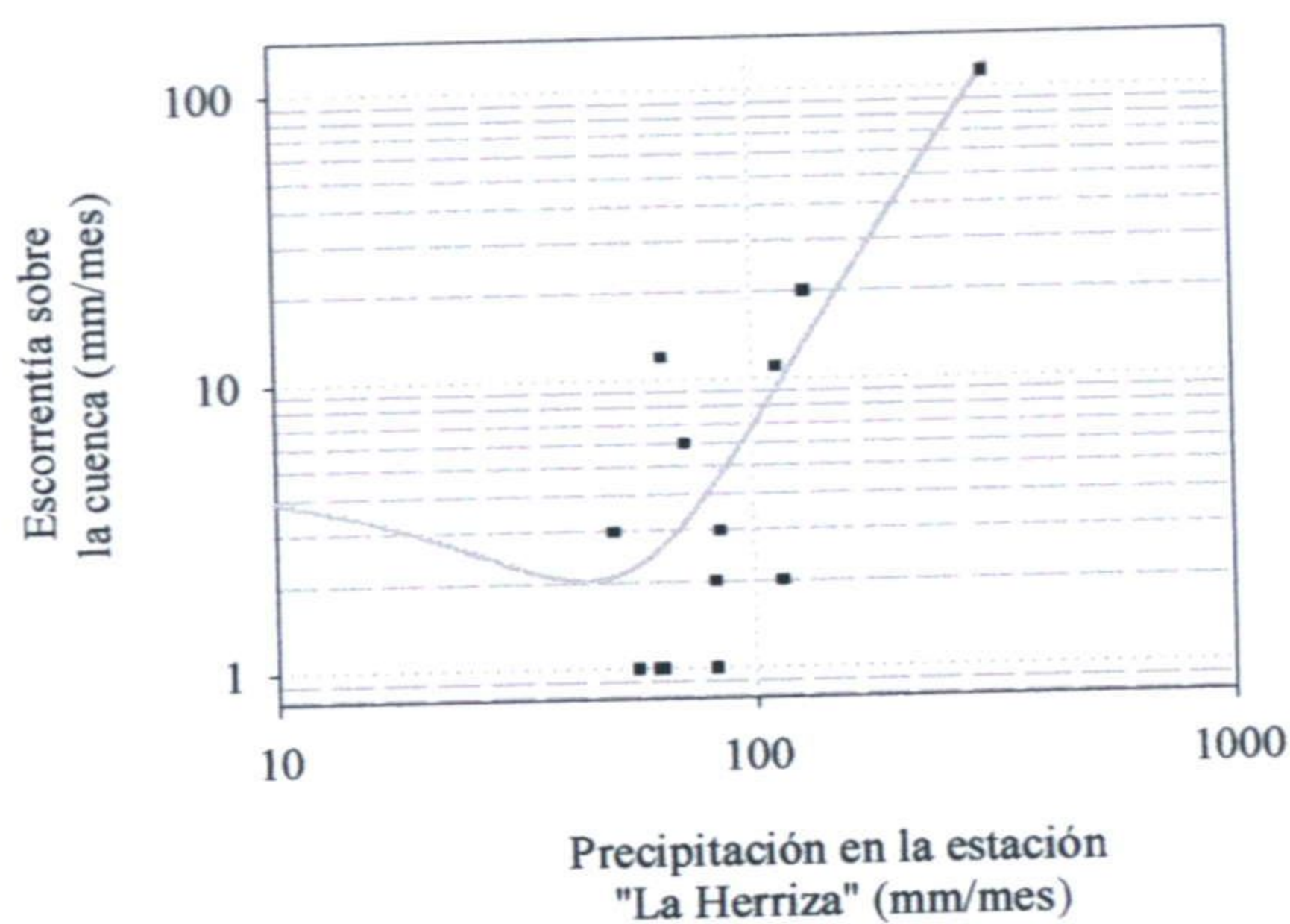


Figura 3.5. Relación entre la precipitación y la escorrentía superficial en la laguna de Fuente de Piedra para el periodo 1989-1994 (modificado de Almécija, 1997)

calculado utilizando una curva ($y = 0.0016x^2 - 0.1392x + 5.121$; $x > 45$, figura 3.5.) ajustada a datos de precipitación - escorrentía superficial obtenidos en este sistema para el periodo 1989 - 1994 (Almécija, 1997). Los datos diarios de precipitación y evaporación en tanque (clase A) se han obtenido de la estación del Cerro del Palo, y la

altura diaria del nivel de agua de un limnógrafo instalado en el pozo abierto que existe en las antiguas salinas, en el interior de la laguna. En este caso se ha tenido en cuenta la variación de la superficie de agua para los cálculos de evaporación y almacenamiento (figura 3.4.), ya que se considera que estas variaciones deben modificar sensiblemente los resultados del balance debido al mayor tamaño de este sistema (figura 3.6.).



Figura 3.6. Vista aérea de la laguna de Fuente de Piedra, el pueblo de Campillos y las lagunas Dulce y Salada (fotografía tomada por V. Plagentz en enero de 1999)

En el caso de las albuferas de Adra se ha seguido la misma metodología salvo, como se ha comentado anteriormente, para cuantificar la entrada superficial desde las cuencas vertientes. La precipitación y la evaporación diarias corresponden a las registradas en la estación de "Las Palmerillas", situada a una altitud de 151 m. Estos datos se han totalizado posteriormente para obtener valores mensuales. Para el estudio de la aportación superficial a las albuferas se han tenido en cuenta, además de la precipitación directa sobre las mismas (EP), la entrada desde acequias y la entrada desde las ramblas que vierten a la albufera Honda. Se ha despreciado la escorrentía superficial difusa, ya que las albuferas están rodeadas hasta la misma orilla de invernaderos que interceptan este flujo.

Tanto la albufera Honda como la albufera Nueva reciben un importante aporte superficial de agua del río Adra a través de la Acequia Real de Adra, que desemboca en ambas albuferas tras bifurcarse poco antes de llegar a las mismas. La albufera Honda recibe aportes desde la denominada "acequia H" y la albufera Nueva recibe aportes de la "acequia N1" y la "acequia N2" (ver figura 3.7.). Los caudales se han medido con un molinete digital suministrado por Geonatura.

En la albufera Honda desembocan tres ramblas, situadas en la zona oeste del borde sur de la Sierra de Gádor: la rambla "de la Estanquera", la rambla "de las Adelfas" y la rambla "del Alto". Para calcular las aportaciones superficiales de estas ramblas se ha utilizado un método (Martín Rosales, 1997) en el que se consideran tres parámetros: la precipitación diaria, la superficie de las cuencas vertientes de las ramblas y el

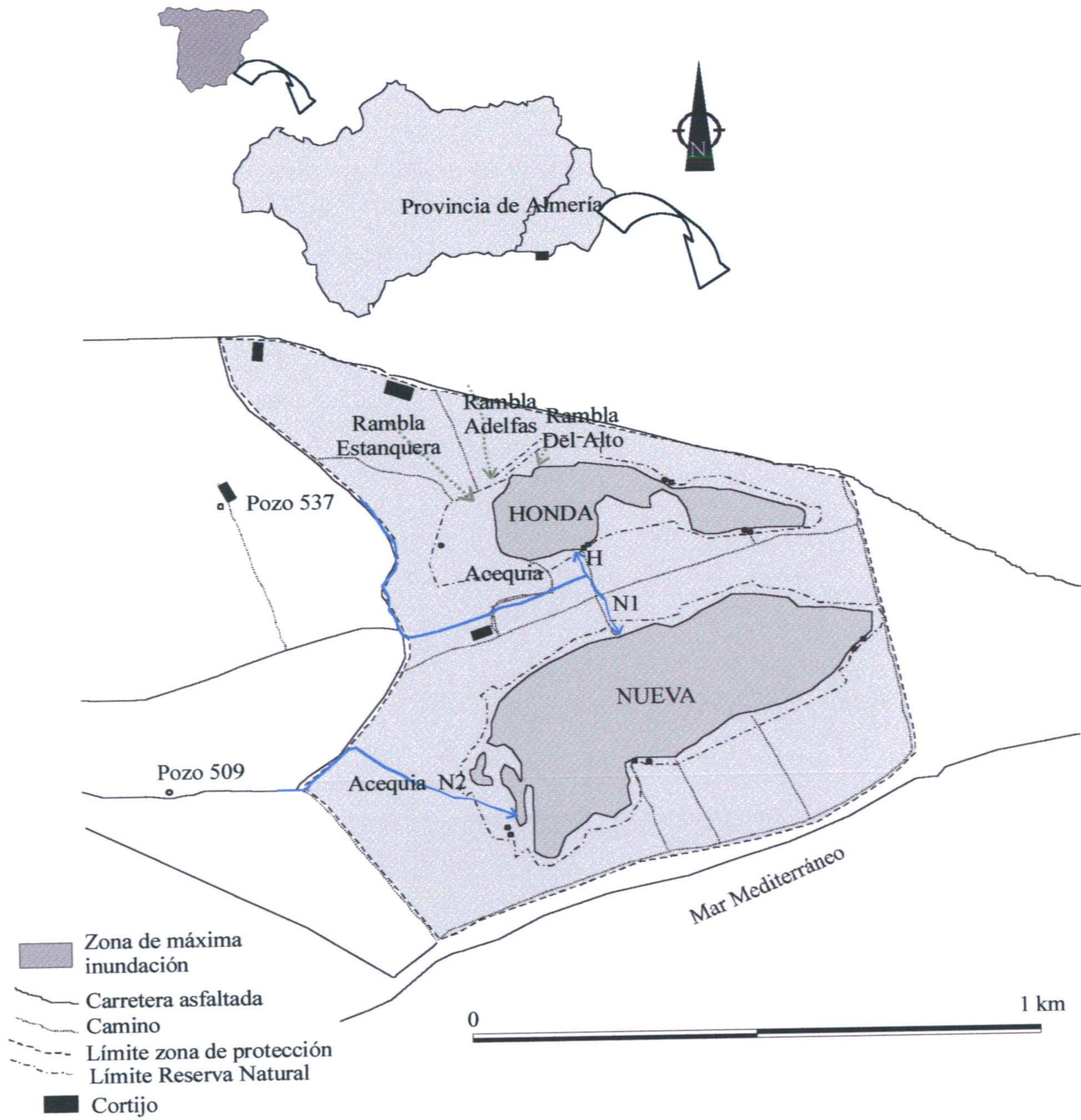


Figura 3.7. Acequias y ramblas que desembocan en las Albuferas de Adra

coeficiente de escorrentía. En función de la litología y el uso de los suelos se ha obtenido un valor mínimo de precipitación para que se produzca escorrentía en las ramblas; este valor es de 25 mm. El coeficiente de escorrentía es diferente en cada rambla; 0.22, 0.21 y 0.19 respectivamente.

3.2.2. Evolución de niveles de agua superficial y subterránea

En la figura 3.8. se puede observar la evolución de niveles de agua superficial en las albuferas de Adra durante el periodo de realización de los balances hídricos (marzo de 1999 a junio de 2000). Los niveles mínimos se midieron al final del estiaje y, a partir de ahí, se van recuperando. En este periodo concreto, y debido a las precipitaciones del mes de octubre de 1999, los máximos corresponden a noviembre, y el mayor

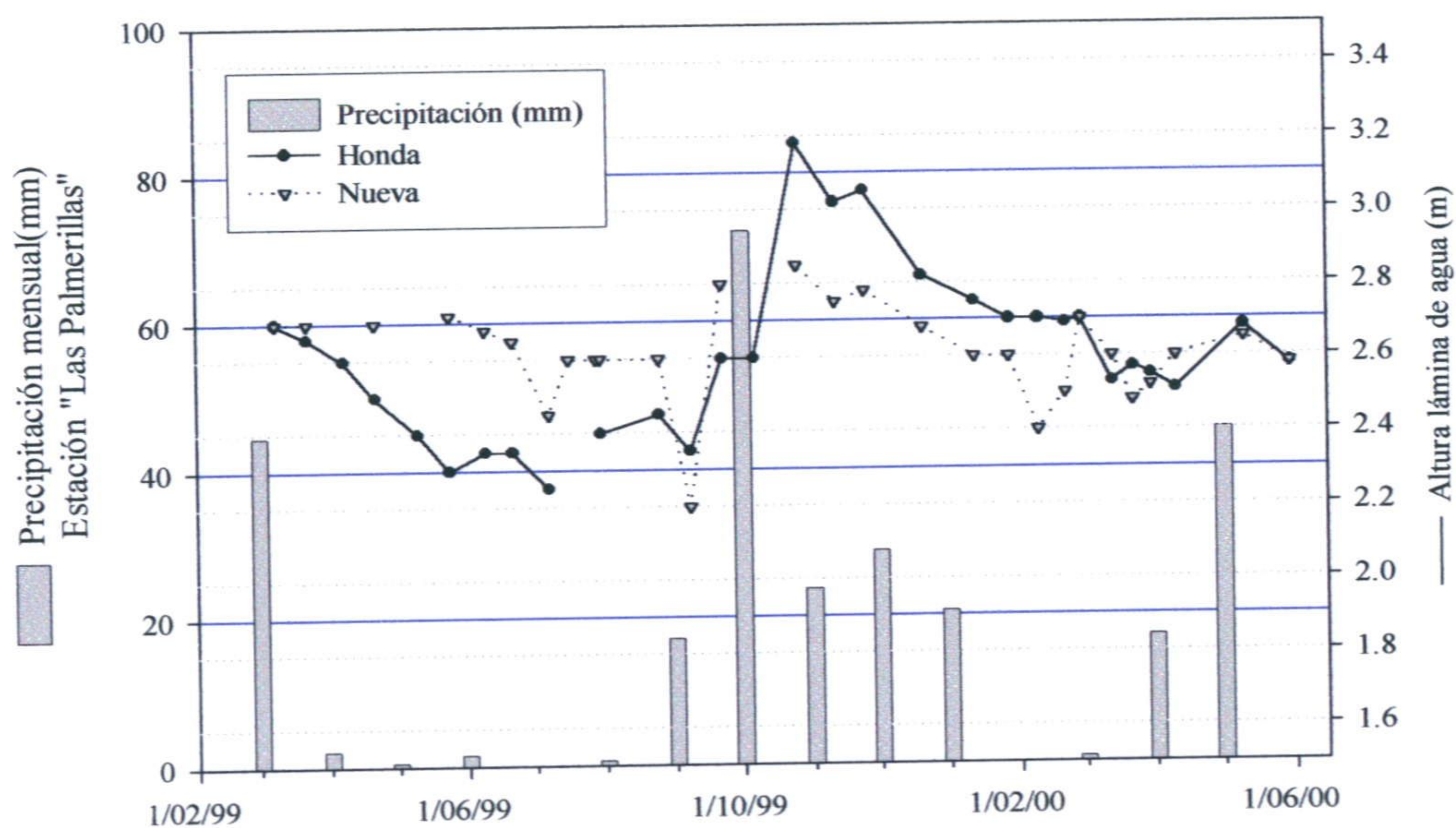


Figura 3.8. Evolución de niveles de agua superficial en las albuferas de Adra y precipitación en la estación "Las Palmerillas", El Ejido (fuente de los datos meteorológicos: INM)

almacenamiento se produjo en la albufera Honda, debido a las aportaciones de las ramblas que en ella desembocan. Los datos de las lagunas de Archidona y Antequera, durante el periodo de campañas de muestreos intensivos (marzo de 1997 a octubre de

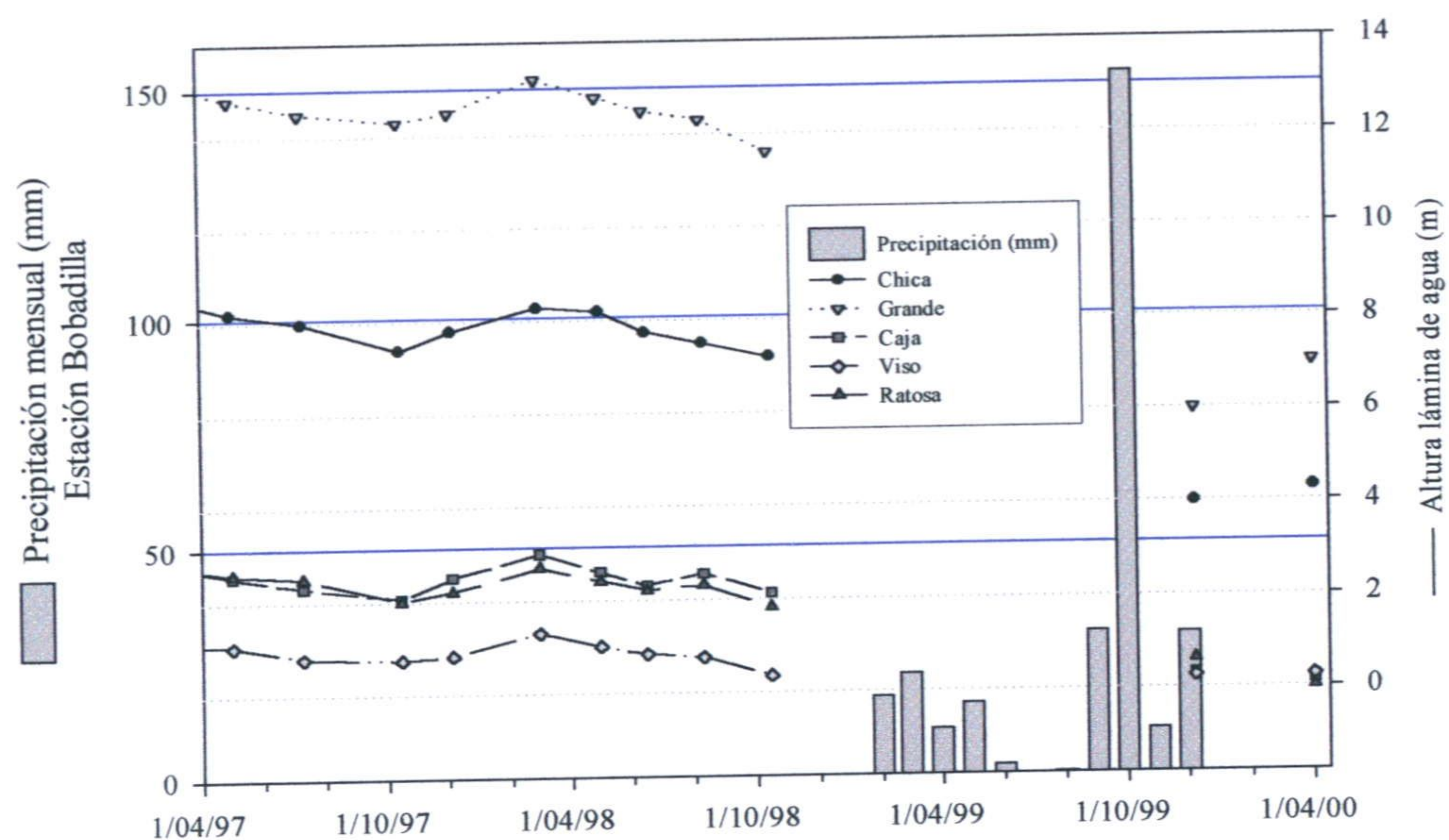


Figura 3.9. Evolución de niveles de agua superficial en las lagunas de Archidona, Antequera y la Ratosa, y precipitación durante el año 1999 en la estación "Bobadilla, Destacamento" (Fuente de los datos meteorológicos: INM)

1998) ponen de manifiesto que la evolución de los niveles fue muy similar: mínimos al final del estiaje y máximos entre marzo y abril; las fluctuaciones de nivel de agua libre

en estos sistemas son de un rango mayor que en las albuferas de Adra. En las lagunas Grande y Chica de Archidona (figura 3.9.) las fluctuaciones del nivel de agua superficial han oscilado en torno a los 5 m; estas lagunas reciben aportes subterráneos y no se llegan a secar completamente en periodos de sequía. Durante el periodo considerado, al ser húmedo, estos contrastes no se aprecian con tanta claridad, aunque la salinidad o la conductividad eléctrica del agua son bastante diferentes entre las lagunas de Archidona y el resto.

En los gráficos de las figuras 3.10. a 3.12. se han representado los valores diarios de precipitación y evaporación en la estación del Cerro del Palo, desde el año hidrológico 96-97 hasta mayo de 2001, así como la evolución de la superficie de agua libre en las lagunas de Fuente de Piedra, Campillos y la Ratosa.

En Fuente de Piedra se dispone de registros diarios de precipitación, evaporación y nivel de agua, al menos, desde el año 1982. La laguna permanece inundada durante todo el año hidrológico sólo en el caso en que la precipitación supere los 700 mm/año, como en el año 89/90, en que las lluvias provocaron inundaciones en la ciudad de Málaga, y en el 96/97, con precipitaciones de aproximadamente 720 mm/año; de hecho, estas precipitaciones y las del siguiente año hidrológico (algo más de 500 mm) mantuvieron el sistema inundado hasta el día 4 de agosto de 1999, es decir, durante 995 días seguidos. En años hidrológicos en los que la precipitación es de 300 - 400 mm, la laguna mantiene una lámina de agua en torno a los 40 - 50 cm hasta los meses de junio a agosto, en los que se seca. La evaporación es el fenómeno que condiciona el vaciado de la laguna (figura 3.10.); el ritmo de descenso del nivel de agua libre se correlaciona todos los años con el incremento del valor de la evaporación diaria en los periodos en que ésta empieza a ser más intensa.

La distribución de la precipitación en el tiempo también influye en la recarga de la laguna; es más eficaz una distribución homogénea que la concentración en aguaceros ocasionales. La distribución estacional influye también en la magnitud de la recarga; en el caso de que los aguaceros se produzcan en estiaje contribuyen poco a la recarga, debido a la intensa evaporación. El 24 de mayo de 1997 fue el día de máxima precipitación del periodo de estudio (57.5 mm), y se incrementó el nivel sólo 4 cm. Sin embargo las precipitaciones de principios de febrero de 1998 fueron menos intensas, pero la laguna recuperó más de 10 cm de nivel.

Entre el 15 de julio y el 12 de octubre de 2000 la laguna permaneció seca. La precipitación durante el año hidrológico 99/00 fue de 420 mm. No fue, sin embargo, el año más seco. En el año hidrológico 98/99 llovió menos de la mitad (180 mm), pero la laguna mantuvo agua hasta el 4 de agosto, como se ha mencionado anteriormente, lo cual evidencia la regulación del acuífero.

Laguna	Ratosa	Cerero	Dulce	Fuente de Piedra	Salada	Capacete	Camuñas
Periodo de medidas	5/10/98 a 15/5/01	8/10/97 a 22/5/01	8/10/97 a 22/5/01	1/10/96 a 18/05/01	8/10/97 a 22/5/01	8/10/97 a 22/5/01	8/10/97 a 22/5/01
Número de medidas	69	70	70	1691	70	70	70
Profundidad promedio (cm)	123.2	120.1	87.2	70.5	70.9	36.2	13.0

Tabla 3.2. *Altura de la lámina de agua promedio, durante el periodo indicado, de las lagunas de Fuente de Piedra, Campillos y Ratosa*

Gran parte de lo comentado hasta ahora es aplicable también a las lagunas de Campillos y la Ratosa, aunque el registro sistemático de los niveles en estos sistemas se

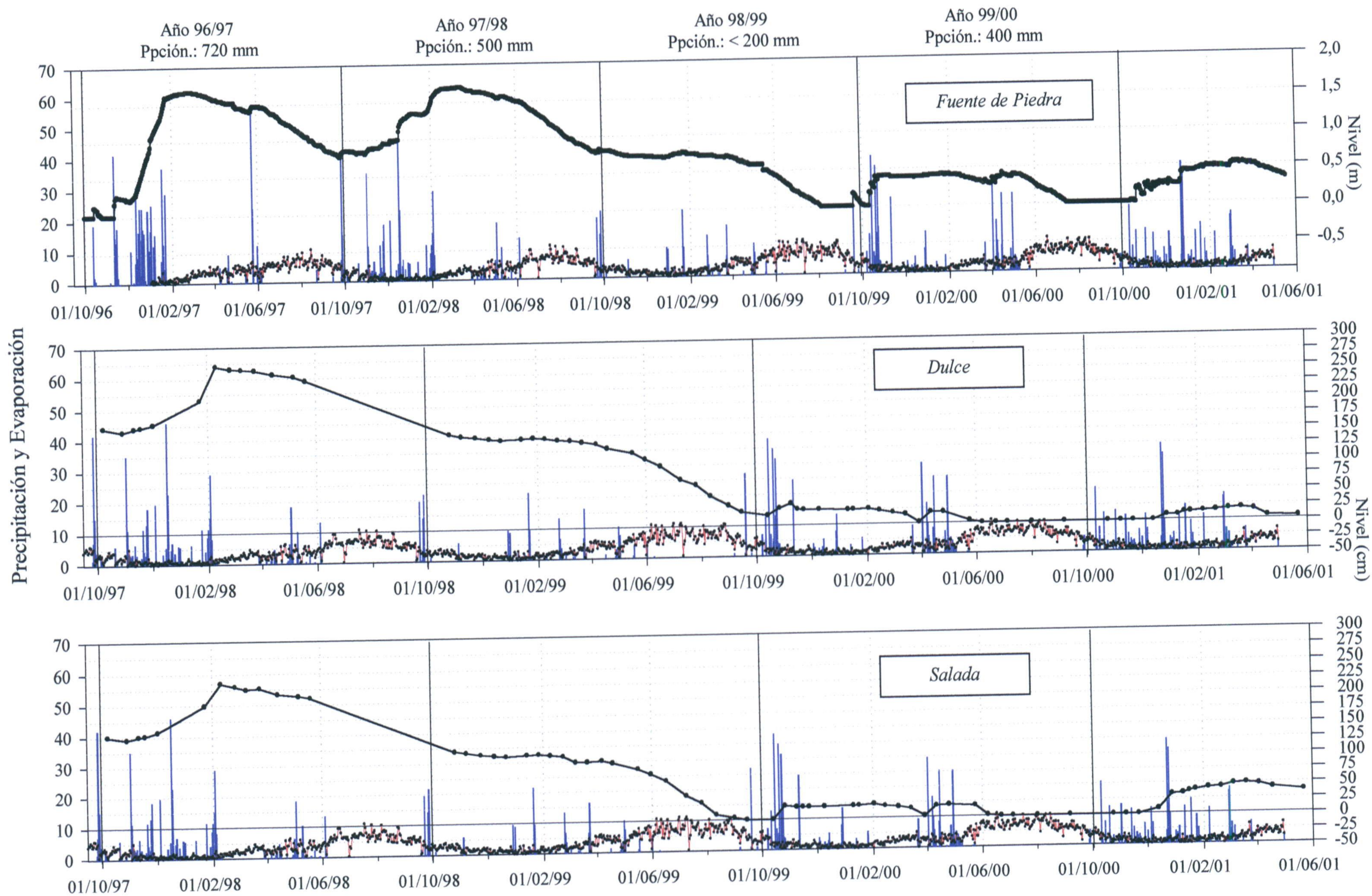


Figura 3.10. Evolución de niveles, precipitación y evaporación real en las lagunas de Fuente de Piedra, Dulce y Salada durante el periodo de estudio

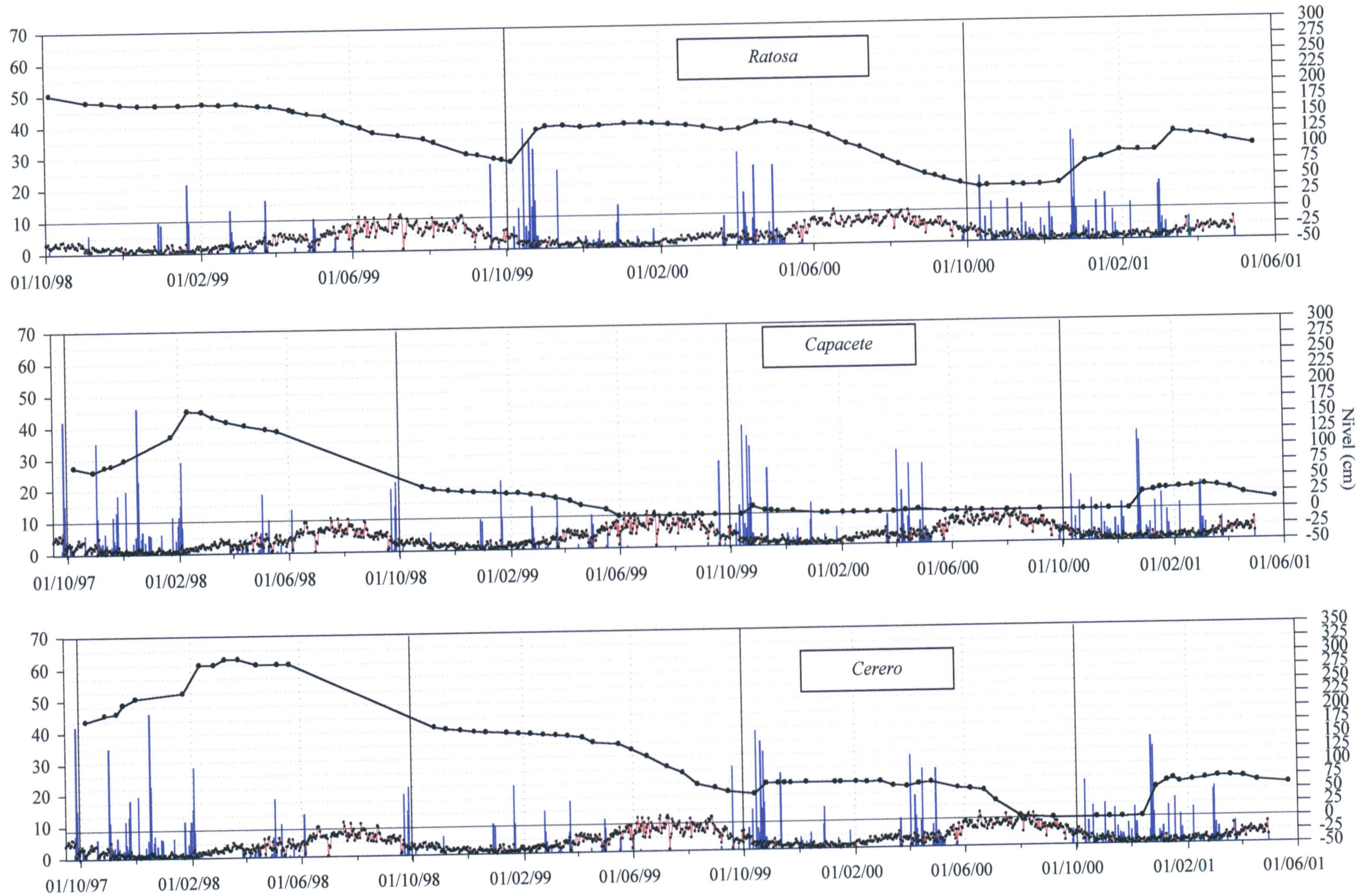


Figura 3.11. Evolución de niveles, precipitación y evaporación real en las lagunas de Ratosa, Capacete y Cerero durante el periodo de estudio

ha llevado a cabo desde el año hidrológico 97/98 hasta la fecha. Las lagunas Dulce y Salada de Campillos (figura 3.10.) muestran una evolución de niveles similar a Fuente de Piedra, y su profundidad promedio es también semejante, en torno a 0.7 m (tabla 3.2.). Durante el periodo de estudio, la laguna Dulce se ha secado únicamente durante el año hidrológico 99/00, aunque el año anterior casi se secó completamente (16 cm el 13 de octubre de 1999). Durante estas fechas se secó la laguna Salada, tras un periodo en el que no hubo precipitaciones durante cuatro meses seguidos (junio - septiembre de 1999); el año hidrológico 98/99 fue extremadamente seco y en él se produjeron los máximos índices de evaporación en el periodo de estudio (6.59 mm/día promedio durante estos cuatro meses). Durante el año 99/00 ambas lagunas se secaron durante el estiaje y comenzaron a recuperar los niveles tras las lluvias de diciembre y enero de 2001. En mayo de 2001 la laguna Dulce se secó, mientras que la Salada mantuvo un nivel de 0.5 m. Almécija (1997) observó una evolución similar durante el periodo 89 - 94: la laguna Dulce, tras las precipitaciones de 1989, permaneció con agua hasta el estiaje de 1992, y a partir de entonces no llegó a almacenar agua hasta 1994. La laguna Salada, sin embargo, se comporta de manera semejante a la laguna de Fuente de Piedra, con ciclos de secado estival y llenado invernal.

Las lagunas de Capacete y Camuñas, con 36 y 13 cm de nivel promedio, respectivamente, son las que han permanecido secas un mayor periodo de tiempo, durante gran parte del año hidrológico 98/99 y casi todo el 99/00. Estas dos lagunas están comunicadas por un canal, al que la laguna de Camuñas, situada a mayor cota, aporta agua cuando su nivel supera 45 cm de altura. Esta laguna responde con rapidez a los episodios lluviosos, acumulando el agua de su pequeña cuenca vertiente, como se puede observar en la figura 3.12. En el año hidrológico 99/00 sólo almacenó agua tras las lluvias de noviembre de 1999 y abril de 2000 y se secó con rapidez.

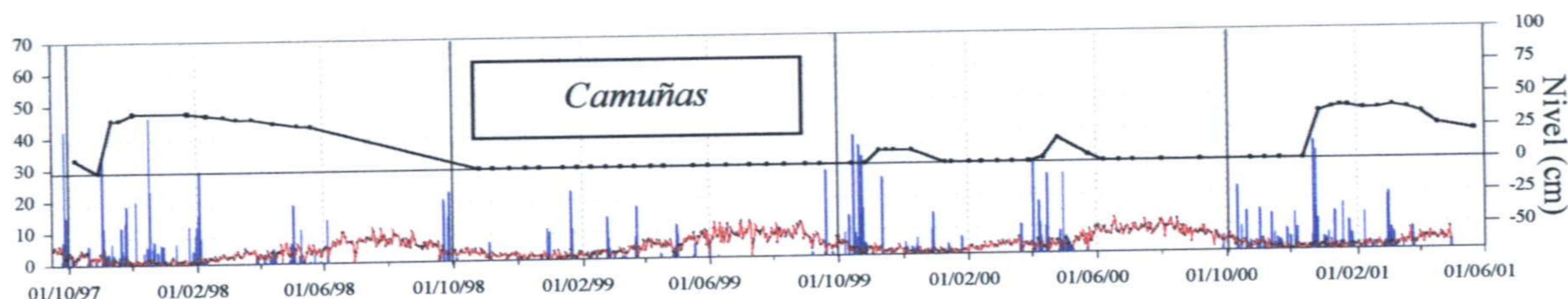


Figura 3.12. Evolución de niveles, precipitación y evaporación real en la laguna de Camuñas durante el periodo de estudio

Las lagunas de Cerero y la Ratosa son las que, con 120 cm y 123 cm, respectivamente, presentan un mayor nivel medio de agua. La evolución de sus niveles (figura 3.11.) es similar. La laguna de Cerero no se secó hasta finales del año hidrológico 99/00 y volvió a recuperar los niveles tras las lluvias de diciembre de 2000. La laguna de la Ratosa no se llegó a secar durante el periodo de estudio y mantuvo una lámina de agua de 32 cm en la fecha en la que se midió el mínimo nivel (11 de octubre de 2000). La máxima inundación, con un nivel de más de 2 m, provocó la unión de esta laguna con la pequeña laguna anexa de la Herriza de los Ladrones, o laguna del Castañal. Esta situación se observó en los meses de febrero - marzo de 1998. Tanto la laguna de Cerero como la Ratosa están situadas cerca de dos elevaciones relativamente

importantes, en el primer caso el Cerro Romeroso, constituido por calcarenitas del Mioceno Superior, y en el segundo la sierra de la Camorra, en la que afloran calizas del Lías - Dogger. Ambos materiales son permeables y posiblemente sea esta la razón de que el almacenamiento sea mayor en estos sistemas. La laguna Redonda permaneció inundada durante la mayor parte del año 97/98; en los siguientes años hidrológicos se secó periódicamente ya que su cubeta ha permanecido llena de escombros hasta el año 2000, en el que se retiraron estos vertidos.

La evolución de los niveles de agua subterránea en los piezómetros instalados en las lagunas de la Ratososa, Dulce y Fuente de Piedra sigue un patrón de evolución similar a los niveles de agua superficial (figura 3.13.), ya que la mayor parte de estos piezómetros están situados en el borde de las lagunas y llegan a estar sumergidos en los periodos de máxima inundación. En los piezómetros instalados en la laguna Dulce el nivel más bajo se registró en el mes de octubre de 1997, y el nivel más alto se registró en febrero de 1998.

En los piezómetros de la laguna de Fuente de Piedra y Ratososa la evolución es similar, y las diferencias que se observan entre los piezómetros Latas y Charcón son consecuencia de flujos de agua subterránea locales existentes en el sector del piezómetro Latas, que se sitúa al borde de un afloramiento de rocas carbonáticas triásicas. Los valores de conductividad eléctrica y salinidad del agua subterránea registrados en este piezómetro son menores que en el resto de piezómetros, y la existencia de manantiales de agua dulce en este sector corrobora esta hipótesis.

El nivel piezométrico del acuífero del delta del río Adra (ITGE, 1998) en el sector de las albuferas se localiza entre la cota + 0.5 m y el nivel medio del mar. Los datos piezométricos disponibles ponen de manifiesto que el flujo subterráneo en dicho sector posee valores del gradiente del orden de 0.2 por mil.

De acuerdo con la información procedente de los dos piezómetros de la red de la CASE (periodo 1993 - 1999), en el entorno de las albuferas los niveles más altos se miden entre finales de otoño y principios de primavera, y los más bajos en verano y principios de otoño. En el piezómetro 509, a unos 500 m del borde costero, los niveles piezométricos extremos registrados fueron aproximadamente 0 m (junio 1995) y 1 m snm. (abril de 1997). En el piezómetro 537, a unos 1200 m de la costa, los valores extremos no difieren sensiblemente de los anteriores, y se registraron en fechas análogas. Se trata del efecto de la sequía de los años 1994 y 1995 y de la abundante pluviosidad de los años 1996 y 1997.

En el piezómetro HO, situado en el sector de confluencia de la rambla de la Estanquera con la albufera Honda, las medidas revelan cotas piezométricas aproximadas entre 0.3 y 0.6 m snm. En todas las campañas el nivel piezométrico se encontraba más bajo (unos 10 - 20 cm) que el de la lámina libre de la laguna. En los piezómetros HN se han medido cotas entre + 0.15 y + 0.45 m, igualmente entre 20 y 30 cm más bajos que el nivel correspondiente registrado en la Albufera Honda. Esta misma situación se localiza en el borde sur de dicha albufera (HS1): cotas entre + 0.1 m y + 0.35 m, cuando el nivel en la laguna era de + 0.4 m y 0.7 m, respectivamente.

En los piezómetros alrededor de la Albufera Nueva los niveles más bajos han correspondido a cotas entre 0 y - 10 cm mientras que los más altos eran próximos a + 10

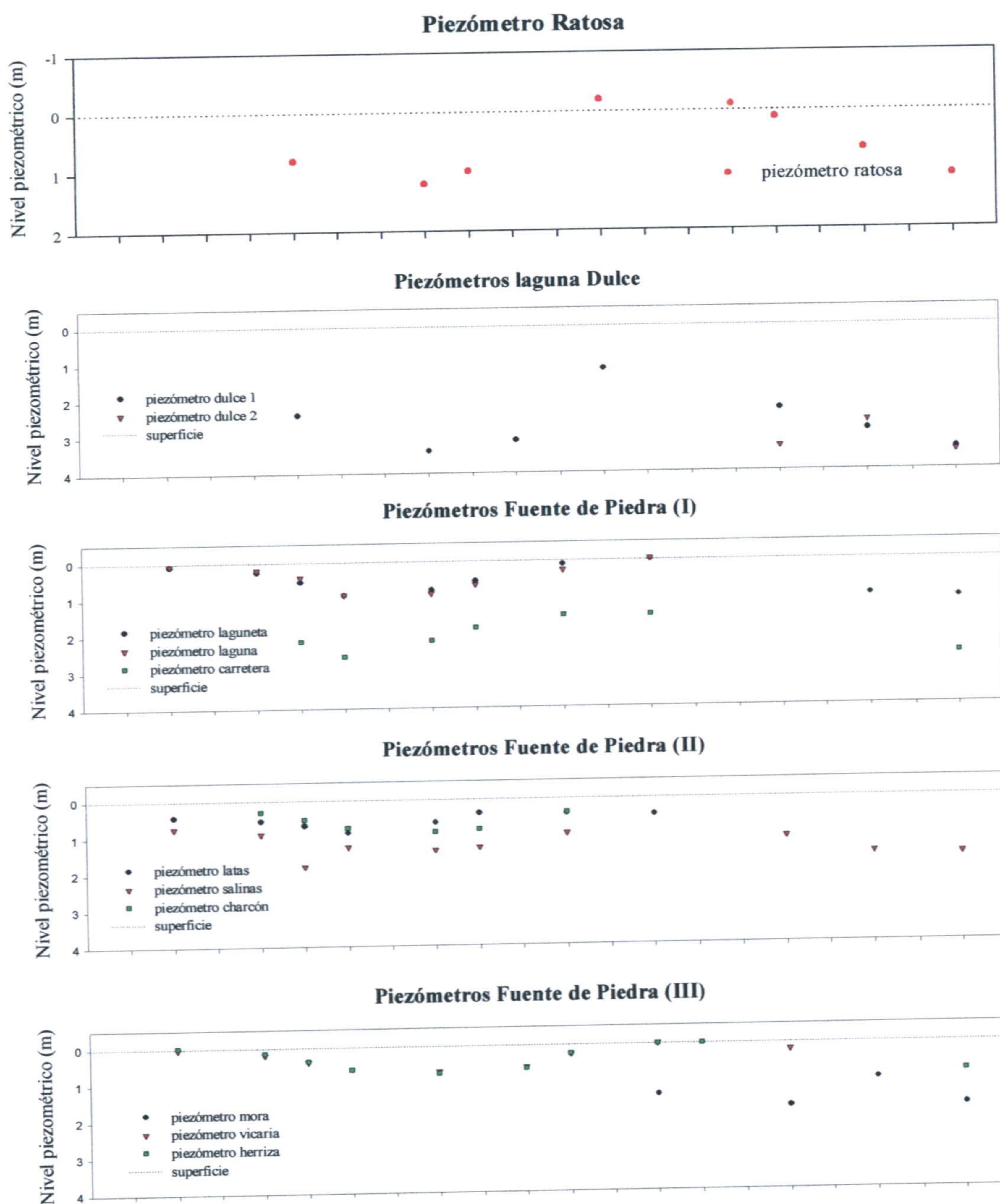


Figura 3.13. Evolución piezométrica en las lagunas de Fuente de Piedra, Ratosa y Dulce

cm. Estos niveles son, al igual que en la otra albufera, entre 10 y 20 cm más bajos que los medidos en lámina de agua libre de la laguna adyacente.

Sin apenas excepciones, los niveles piezométricos más altos se han medido a mediados de abril y los más bajos a mediados de diciembre.

En la figura 3.14. se pueden observar las direcciones de flujo en el entorno inmediato de las albuferas. Al producirse los episodios de recarga superficial por las ramblas, el nivel de agua asciende en poco tiempo en la albufera Honda y parte de esta agua se infiltra y recarga a la albufera Nueva; ésta recibe el agua, pero el ascenso de niveles es más suave. Esta interpretación se confirma con los resultados obtenidos con la realización de balances hídricos en las albuferas. Este comportamiento refleja una cierta peculiaridad en lo referente a la dinámica hidrológica de este tipo de zonas húmedas, en las que, generalmente, es el acuífero deltaico el que recarga las lagunas.

3.2.3. Clasificación hidrológica

La clasificación hidrológica de los sistemas lagunares estudiados se ha realizado en función del régimen hídrico, es decir, en función de la procedencia de los aportes hídricos que recibe cada sistema: si los aportes son exclusivamente superficiales, el sistema es epigénico; si son exclusivamente subterráneos, el sistema es hipogénico; entre estos dos casos extremos hay casos mixtos, si es que reciben aportes tanto subterráneos como superficiales. Las lagunas costeras se clasifican atendiendo a otros criterios, según el régimen sea mareal o fluvio - mareal. En ambos casos estos sistemas costeros reciben aportes subterráneos debido a que el sustrato suele ser muy permeable (sedimentos fluviales o fluvio - mareales) y a estar situadas cerca de la línea de costa, que constituye, desde el punto de vista hidrogeológico, un nivel constante y una zona de descarga para la mayoría de acuíferos costeros, al menos en régimen natural o con explotación moderada. Por otra parte las lagunas pueden ser clasificadas también en función de su hidroperiodo, o periodo de permanencia del agua superficial en el sistema; así, habrá lagunas permanentes, temporales, etc.

Se han realizado balances hídricos en las lagunas de Campillos relativos a dos periodos: de diciembre de 1995 a noviembre de 1996, y de abril de 1999 a marzo de 2000. Los balances realizados de las albuferas de Adra se refieren al periodo de marzo de 1999 a mayo de 2000.

3.2.3.1 Régimen hídrico e hidroperiodo

Con la excepción de Fuente de Piedra, las lagunas continentales estudiadas reciben el agua fundamentalmente por escorrentía difusa ya que no hay en general una verdadera red superficial que vierta a las mismas. Respecto a las aportaciones subterráneas, las investigaciones realizadas ponen de manifiesto que las únicas lagunas que reciben de manera continuada un aporte de tal tipo son la Grande y la Chica de Archidona, y esta última ni siquiera de forma permanente, ya que llega a secarse en determinados periodos. Las restantes lagunas estudiadas tienen un comportamiento hidrogeológico diverso. Ciertas lagunas de Campillos, así como las lagunas de Caja y Viso, reciben aportes subterráneos cuando el nivel piezométrico se sitúa a mayor cota que la superficie de agua libre, y esto sólo ocurre durante determinados periodos de tiempo. Se clasifican como epigénicas - mixtas, a diferencia de las de Archidona, hipogénicas, o de Fuente de Piedra, mixta. Las lagunas del complejo de la desembocadura del Guadalhorce se clasifican de manera diferente. El régimen hidrológico es fluvio - mareal, y la alimentación es subterránea, aunque el origen de ésta se asocia a un acuífero detrítico y a su cauce fluvial, el río Guadalhorce. Las albuferas de Adra también tienen un régimen hidrológico fluvio - mareal; en este caso el río que alimenta el acuífero es el río Adra.

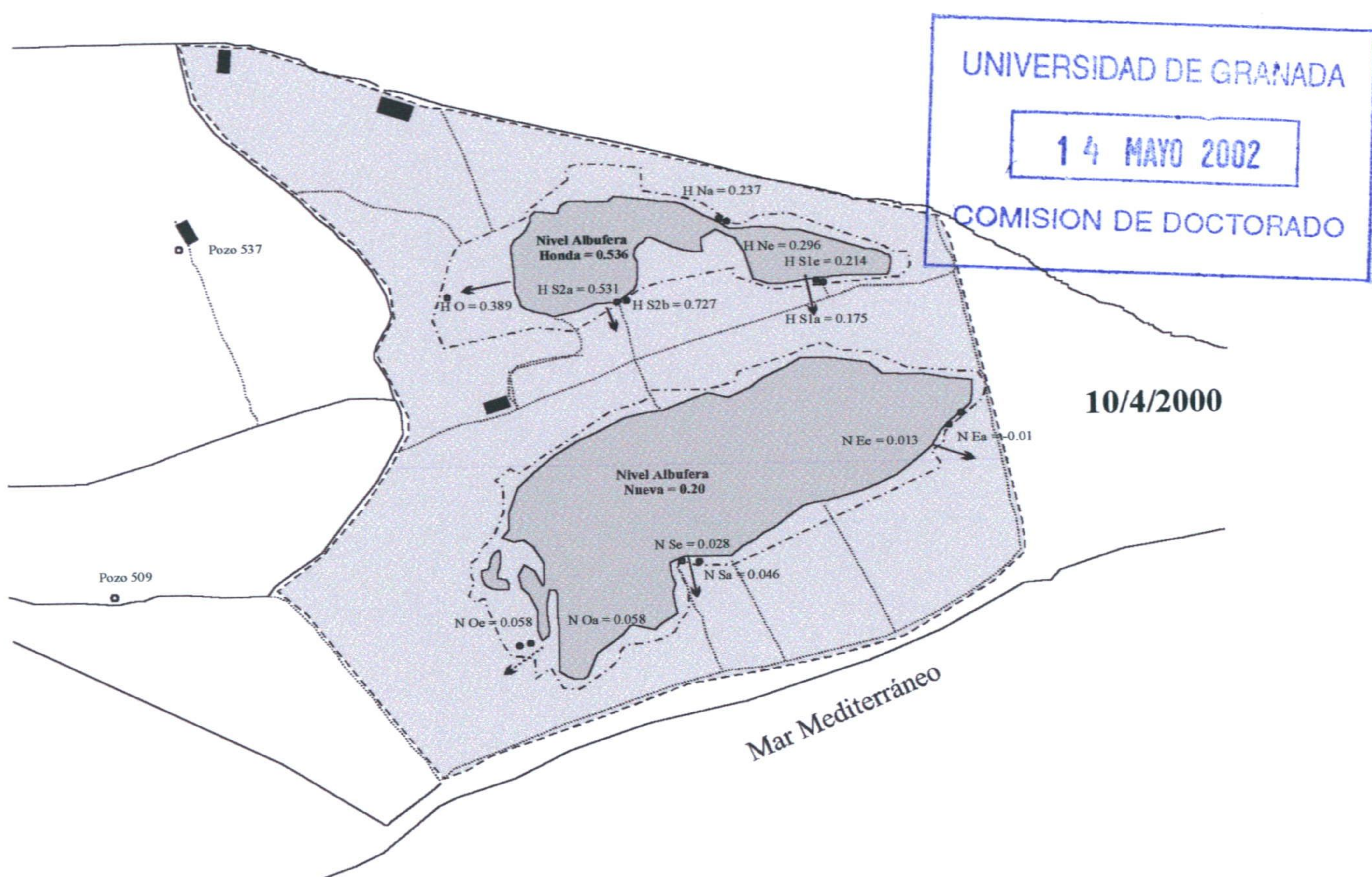
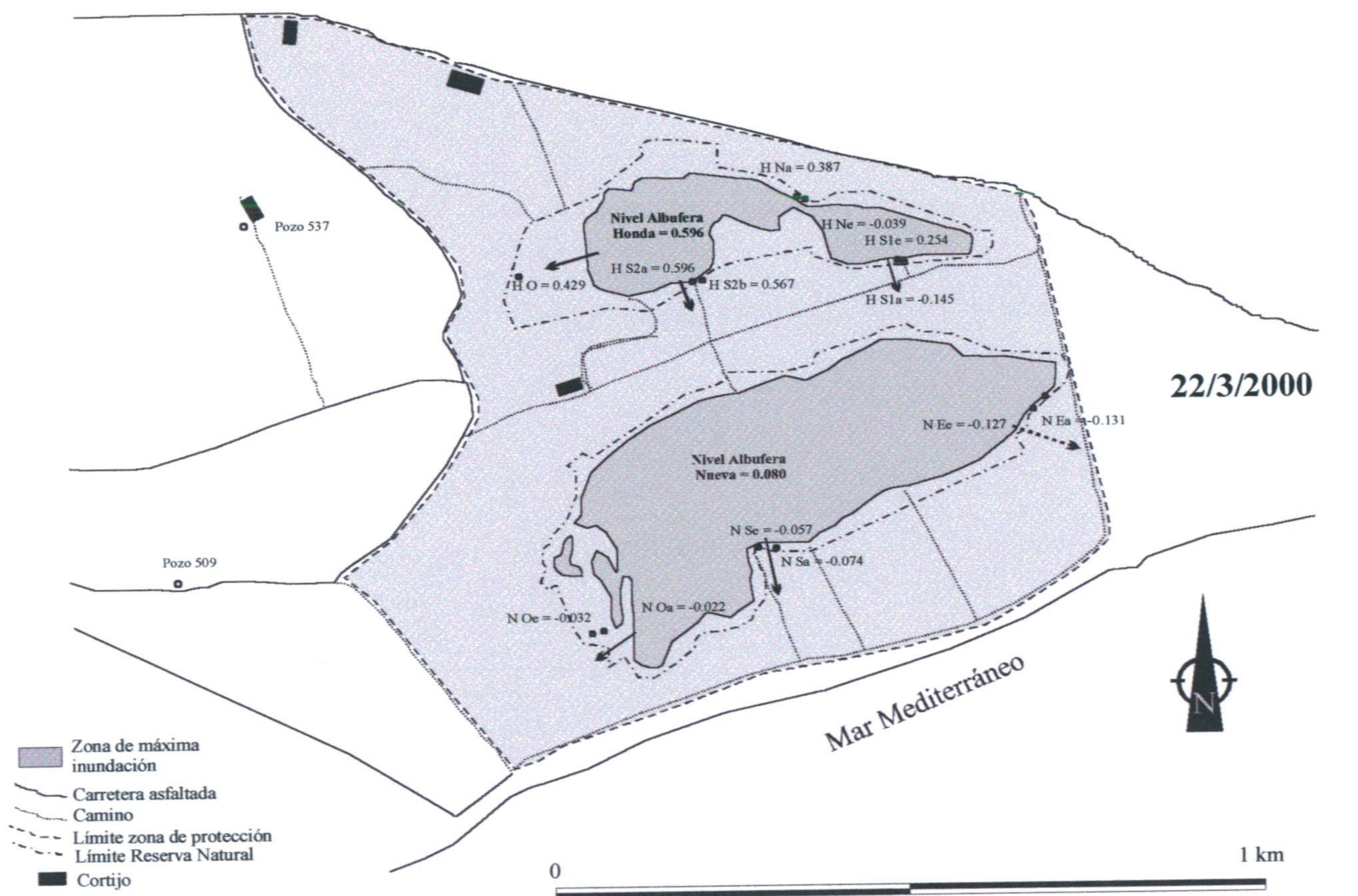


Figura 3.14. Direcciones de flujo en las albuferas de Adra en marzo y abril de 2000

Una característica importante a la hora de poder interpretar correctamente las características físico - químicas del agua de estas lagunas es el hidroperiodo. La secuencia de llenado - evaporación de estas lagunas determina su alto contenido en sales, y el diferente grado de mineralización de sus aguas está relacionado con la frecuencia de dichas secuencias. La laguna de Fuente de Piedra, la laguna de Ratosa y las de Campillos son temporales estacionales, aunque ocasionalmente no se secan algunos años. Las dos lagunas de Campillos más alteradas (Camuñas y Redonda) no se clasifican como temporales, sino como intermitentes.

Respecto a las lagunas de Archidona, la laguna Grande es la única permanente no fluctuante de la provincia de Málaga en sentido estricto; la laguna Chica se clasifica como semipermanente (tabla 3.3.).

El complejo lagunar de la desembocadura del río Guadalhorce y las albuferas de Adra se clasifican de forma diferente, ya que el hidroperiodo no está relacionado con las secuencias de precipitación - evaporación, sino con el régimen mareal y las infiltraciones del río, al ser los acuíferos que las alimentan acuíferos costeros. El régimen es micromareal para ambos sistemas.

3.2.3.2. Balances hídricos

En la figura 3.15. se han representado los distintos componentes del balance hídrico mensual de la laguna de Fuente de Piedra, los resultados netos, el flujo subterráneo, y los estadísticos básicos del mismo. Estos balances han de considerarse como una aproximación a la realidad y los resultados deben ser interpretados como una solución semicuantitativa, que debe reflejar, como mínimo, el orden de magnitud de los valores reales. Esto es así debido a que los cálculos incluyen ecuaciones empíricas o semiempíricas para la estimación de algunos componentes del balance; otros componentes, como la evaporación, han sido utilizados sin considerar la necesaria corrección debida al factor salinidad, que influye en la tasa de evaporación en sistemas de estas características. Sin embargo, los resultados son coherentes con los obtenidos previamente por otros autores, y estos balances permiten conocer la incidencia relativa de las distintas variables en la dinámica hidrológica de estos sistemas, lo cual es fundamental para establecer modelos de gestión de los mismos.

El balance mensual en la laguna de Fuente de Piedra ha permitido establecer que los tres componentes que intervienen en la recarga (precipitación, escorrentía superficial y descarga subterránea) tienen un peso semejante. En el periodo considerado este valor estuvo comprendido entre 4 y 5 $\text{hm}^3/\text{año}$, es decir, entre unos 0.3 y 0.4 hm^3/mes . La precipitación puede alcanzar valores de hasta 2 hm^3/mes y la escorrentía de 3.9 hm^3/mes ; ésta se produce de forma inmediata a las lluvias y llega a la laguna sin ningún tipo de regulación. El flujo subterráneo, sin embargo, y aunque está regulado por el acuífero, varía desde valores negativos de -5.9 hm^3/mes hasta recargas de 8.2 hm^3/mes (invierno de 1997); el patrón suele ser el siguiente: la mayor recarga suele ocurrir hacia la mitad del año hidrológico (diciembre - enero), como consecuencia de las lluvias de otoño, y en junio - julio como consecuencia de las lluvias de primavera. En el año hidrológico 98/99 hubo escasas precipitaciones en la cuenca, pero prácticamente en todos los meses el flujo hacia la laguna fue positivo; esta situación no es frecuente y debido a ella la laguna no se secó hasta agosto de 1999. La evaporación real desde la laguna varía estacionalmente y también como consecuencia del almacenamiento en la

HIDROPERIODO	REGIMEN HIDROLOGICO							
	EPIGENICO		HIPOGENICO		EPIGENICO-MIXTO		MIXTO	
	Drenaje abierto	Drenaje cerrado	Drenaje abierto	Drenaje cerrado	Drenaje abierto	Drenaje cerrado	Drenaje abierto	Drenaje cerrado
Humedales continentales/litorales								
Permanente no fluctuante			<i>Grande</i>					
Permanente fluctuante								
Semipermanente			<i>Chica</i>					
Temporal estacional		<i>Los Hoyos</i> <i>Lobón</i>				<i>Ratosa</i> <i>Dulce</i> <i>Capacete</i> <i>Marcela</i> <i>Viso</i> <i>Caja</i> <i>Salada</i> <i>Cerero</i>		<i>Fuente de Piedra</i>
Temporal intermitente	<i>Camuñas</i>	<i>Herriza de los Ladrones</i> <i>Redonda</i>						
Humedales costeros								
HIDROPERIODO	REGIMEN HIDROLOGICO				REGIMEN HIDROLOGICO			
	MAREAL				FLUVIO-MAREAL			
Micromareal					<i>Desembocadura del Guadalhorce</i> <i>Albuferas de Adra</i>			
Mesomareal								

Tabla 3.3. Clasificación de los sistemas lagunares estudiados según el régimen hídrico y el hidroperiodo

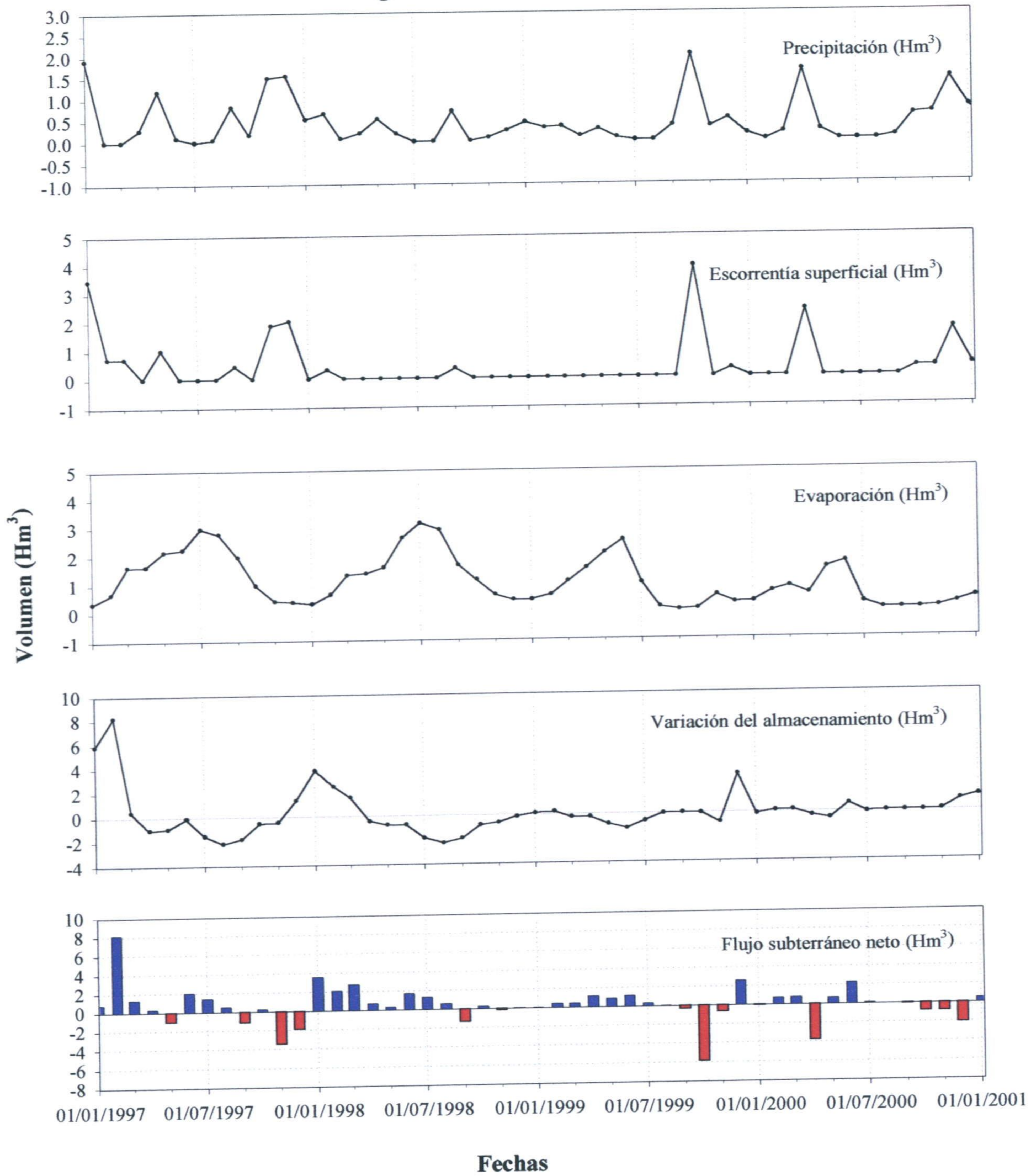
misma, desde 0 a $3.1 \text{ hm}^3/\text{mes}$. Estos valores se asemejan a los obtenidos por Linares (1990) para el periodo 1962 - 1987.

En la laguna de la Ratosa el balance mensual se ha realizado durante el mismo periodo que en el sistema anterior (figura 3.16). Los volúmenes de agua implicados son, aproximadamente, un orden de magnitud menores que en el caso de Fuente de Piedra. En la laguna de la Ratosa los tres componentes que intervienen en la recarga no tienen el mismo peso en el balance; la precipitación presenta valores medios mensuales de $12.5 \cdot 10^{-3} \text{ hm}^3$ y es el componente cuya desviación estándar es menor (0.01), la escorrentía superficial representa $8 \cdot 10^{-3} \text{ hm}^3/\text{mes}$ de aportación media a la laguna y, como en el caso anterior, llega al sistema sin regulación de ningún tipo. Es el flujo subterráneo, con un valor medio de $33.8 \cdot 10^{-3} \text{ hm}^3/\text{mes}$, el componente de la recarga que supone una mayor aportación al sistema: 1.7 hm^3 (figura 3.16). La laguna de la Ratosa no se llegó a secar durante el periodo de estudio; la proximidad de la sierra carbonatada de la Camorra debe ser un factor que contribuya al hecho de que las aportaciones subterráneas sean relativamente importantes. La evaporación varía de forma estacional, desde $0.01 \text{ hm}^3/\text{mes}$ en los meses de invierno a $0.12 \text{ hm}^3/\text{mes}$ durante el estiaje. La variación en el volumen de agua almacenada está comprendida entre $-0.11 \text{ hm}^3/\text{mes}$ y $0.19 \text{ hm}^3/\text{mes}$, si bien la media mensual es de $-0.2 \cdot 10^{-3} \text{ hm}^3$; este componente del balance se correlaciona inversamente con la evaporación (figura 3.16), pero a partir del año hidrológico 98/99 se observa un desfase entre las máximas variaciones de almacenamiento y los mínimos valores de evaporación.

En el caso de las lagunas de Campillos, los balances se han realizado para dos periodos: diciembre de 1995 a noviembre de 1996 (figuras 3.17. I y 3.17. II) y abril de 1999 a marzo de 2000. Los valores están expresados en miles de m^3 .

En el primero de los dos periodos estudiados (1995 - 1996), las aportaciones totales por precipitación directa estuvieron comprendidas entre aproximadamente $45 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Cerero) y $490 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Dulce). La escorrentía superficial difusa estimada para el periodo estudiado representa un 55% de la precipitación total, este componente del balance es el que mayor influencia tiene en la recarga de las lagunas. Casi el 60% de estas aportaciones se produjeron en los dos meses de mayor pluviosidad: diciembre de 1995 y enero de 1996. El volumen total de las aportaciones difusas está condicionado, además de por la distinta extensión de las cuencas vertientes, por la litología del sustrato en cada una de ellas, está comprendido entre $110 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Capacete) y $460 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Dulce). La evaporación media anual en tanque, que se considera representativa de toda la zona de Campillos, supera ligeramente 1600 mm. Aproximadamente la mitad se concentra en los meses de junio, julio y agosto, con valores del orden de 250 - 300 mm/mes. Estas cifras son coherentes con las obtenidas en trabajos previos (Linares, 1990; Almécija, 1997). En estas condiciones es lógico concebir un modelo hidrológico en el que se genere un flujo subterráneo centrípeto. Los volúmenes mensuales de flujo subterráneo resultan positivos en Dulce y Capacete (2.2 y $1.5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ de media, respectivamente) y en Cerero y Salada negativos. En estos valores influye, lógicamente, la extensión de los sistemas cuenca - laguna por lo que, a efectos comparativos, se han transformado estos valores volumétricos en otros de altura de agua equivalente, tomando como referencia la superficie de inundación de cada laguna (figura 3.18.); el resultado es una evolución similar, aunque existe una mayor semejanza entre las

Laguna de Fuente de Piedra



	$Ppición (Hm^3)$	$Evap (Hm^3)$	$dH (Hm^3)$	$Q (Hm^3)$	$G (Hm^3)$
Media	0.41	1.02	0.12	0.39	0.34
Desviación estándar	0.53	0.90	1.81	0.86	1.94
Total	21.92	54.11	6.18	20.42	17.94
Mínimo	0.00	0.00	-2.28	0.00	-5.88
Máximo	1.99	3.12	8.21	3.89	8.16

Figura 3.15. Resultados del balance hídrico realizado en la laguna de Fuente de Piedra

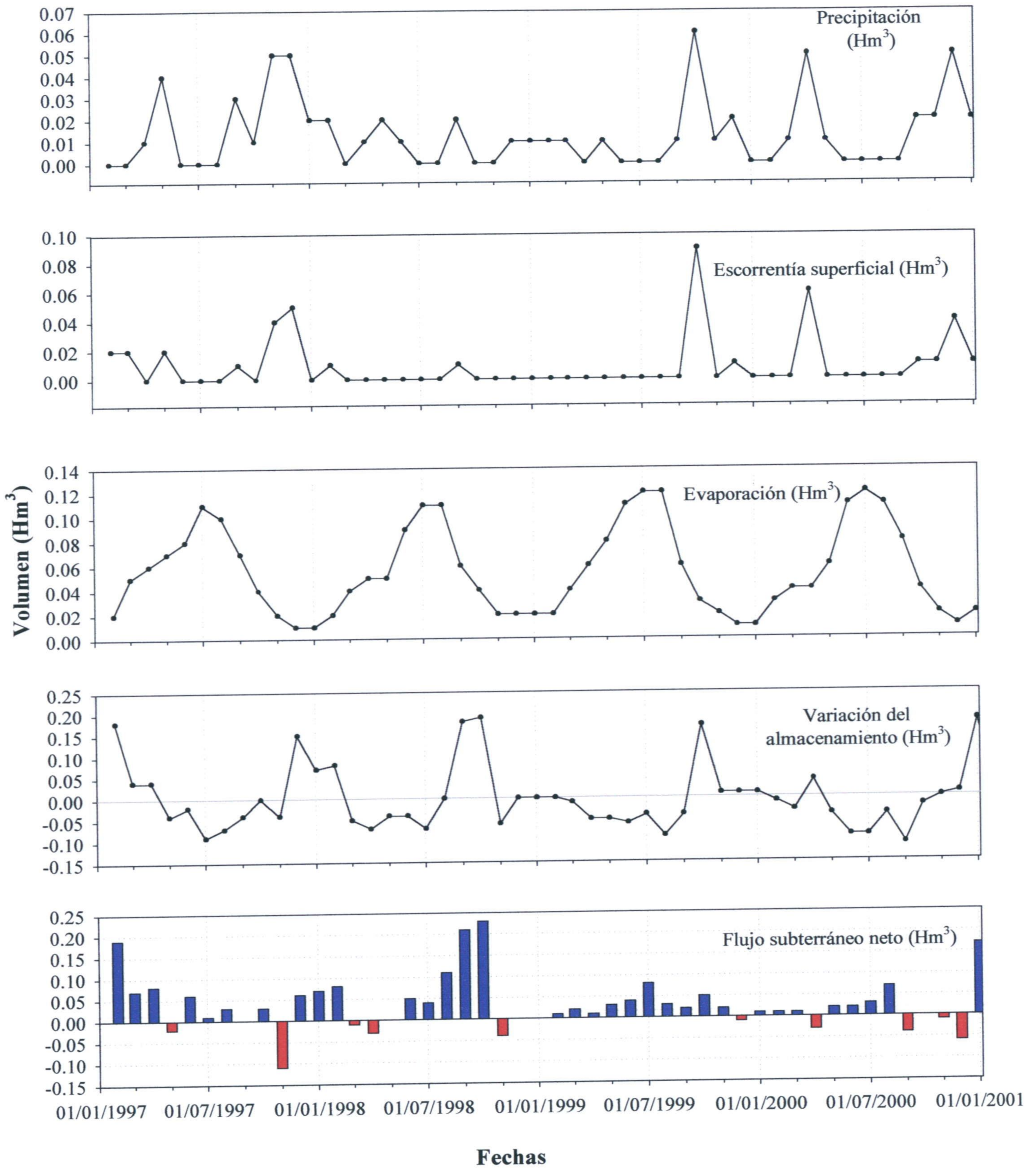
lagunas Dulce y Capacete, por una parte, y Salada y Cerero por otra. Los principales episodios lluviosos (diciembre - enero y mayo) se relacionan con los valores negativos del flujo subterráneo. En la laguna de Capacete, al tener un canal del que recibe agua, es posible que se haya subestimado la recarga por escorrentía; en ese caso los resultados serían similares a los de las lagunas Cerero y Salada. El comportamiento hidrológico diferente entre la laguna Dulce y el resto de las analizadas que se desprende de las figuras y tablas representadas también se había puesto de manifiesto a partir de los resultados tentativos de Almécija y Benavente (1995). Las precipitaciones excepcionales de agosto de 1996 modifican la que, en condiciones normales, debe ser la tendencia general, y se obtienen valores de flujo nulos o negativos.

El periodo 1999 – 2000 es un periodo de escasas precipitaciones en toda la comarca de Antequera; la precipitación total anual, 336 mm, es un 34% inferior al valor medio anual, 509 mm. La evaporación anual fue sensiblemente superior: 1367 mm. Durante 10 de los 12 meses considerados, la evaporación real fue mayor que la precipitación. La laguna Salada, seca en septiembre de 1999, se recargó hasta 22 cm tras las lluvias de octubre de este año, a finales de marzo de 2000 la lámina de agua tenía 10 cm. La laguna Salada recibió aportes subterráneos durante los meses de escasa o nula precipitación; la recarga subterránea total fue positiva: $43 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. La situación de este sistema, formado sobre un acuífero regional compuesto por materiales evaporíticos triásicos karstificadas explicaría la alta salinidad de las aguas en este sistema. En la laguna Dulce la componente neta de flujo subterráneo es negativa, y se corresponde con un descenso de niveles de 433 mm durante el periodo de estudio; la diferencia con el periodo anterior puede ser debida a los bajos niveles piezométricos durante el año seco; tan sólo en periodos húmedos la laguna recibiría aportes subterráneos. El sustrato de la laguna está constituido por una potente capa de arcillas y el hecho de que los flujos subterráneos sean negativos indican, en cualquier caso, que la laguna Dulce tiene una dinámica hidrológica diferente al resto de las lagunas de Campillos.

Los resultados del balance en estos sistemas indican que:

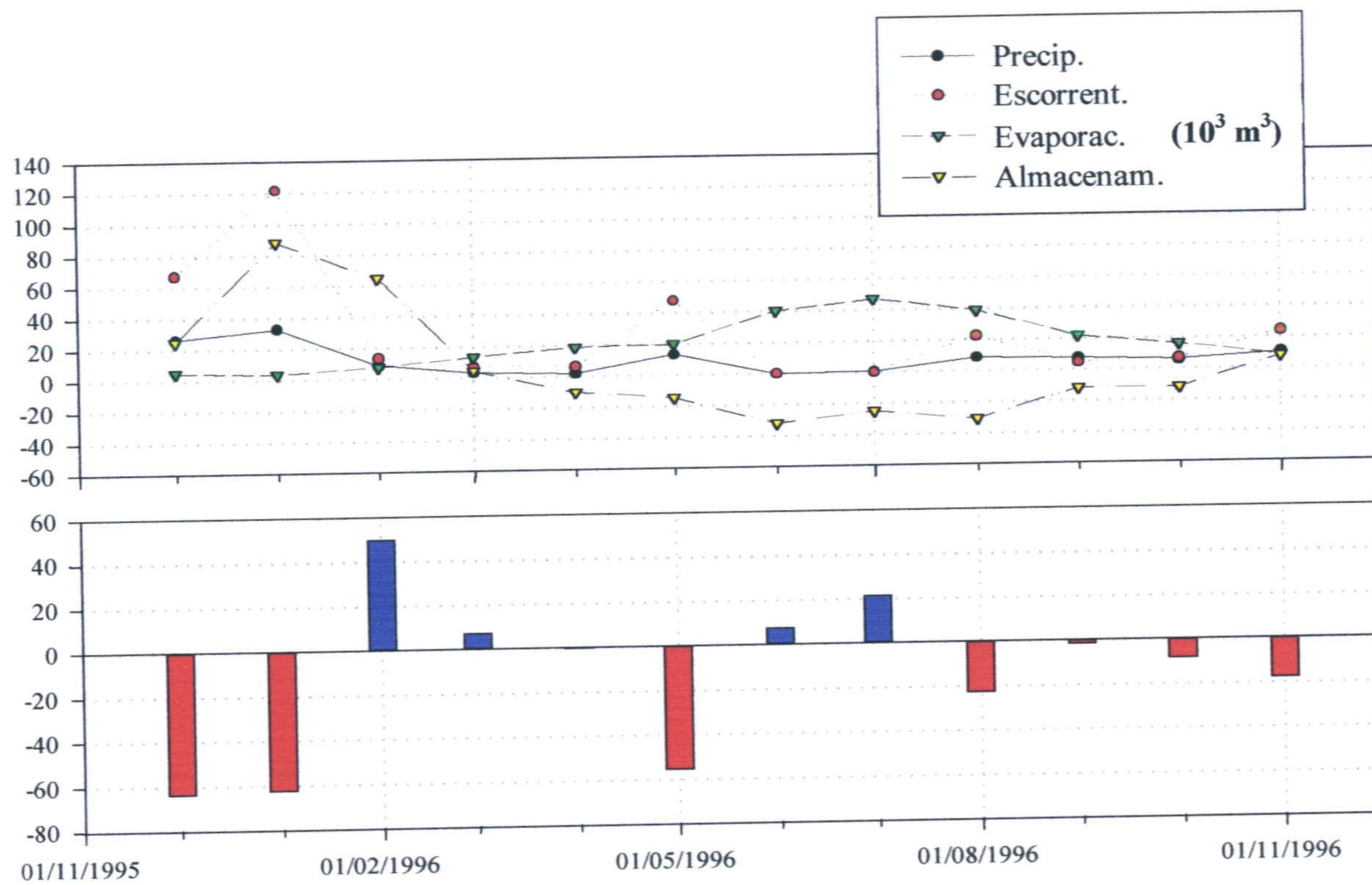
- 1) En la laguna de Fuente de Piedra, la recarga subterránea ($4.5 \text{ hm}^3/\text{año}$) es del mismo orden de magnitud que la recarga por precipitación o escorrentía.
- 2) En la laguna de la Ratosá la recarga subterránea supone la mayor aportación hídrica al sistema y casi alcanza los $2 \text{ hm}^3/\text{año}$.
- 3) En las lagunas de Campillos, dentro de un ámbito hidrogeológico caracterizado por la baja permeabilidad de los materiales que constituyen las cuencas de las lagunas (margas, limos y arcillas fundamentalmente), se observan diferencias entre el régimen hídrico de la laguna Dulce y el resto, que debe relacionarse con un sistema de flujo de tipo local en esta primera laguna. Los resultados obtenidos en las lagunas de Cerero, y sobre todo en la Salada, indican la existencia de sistemas acuíferos de ámbito mayor que el local. Las situaciones de recarga subterránea suelen suceder en verano y se ven favorecidas por la intensa evaporación en estos sistemas. Aún así, la escorrentía superficial difusa constituye el componente más importante de la recarga.

Laguna de Ratosa

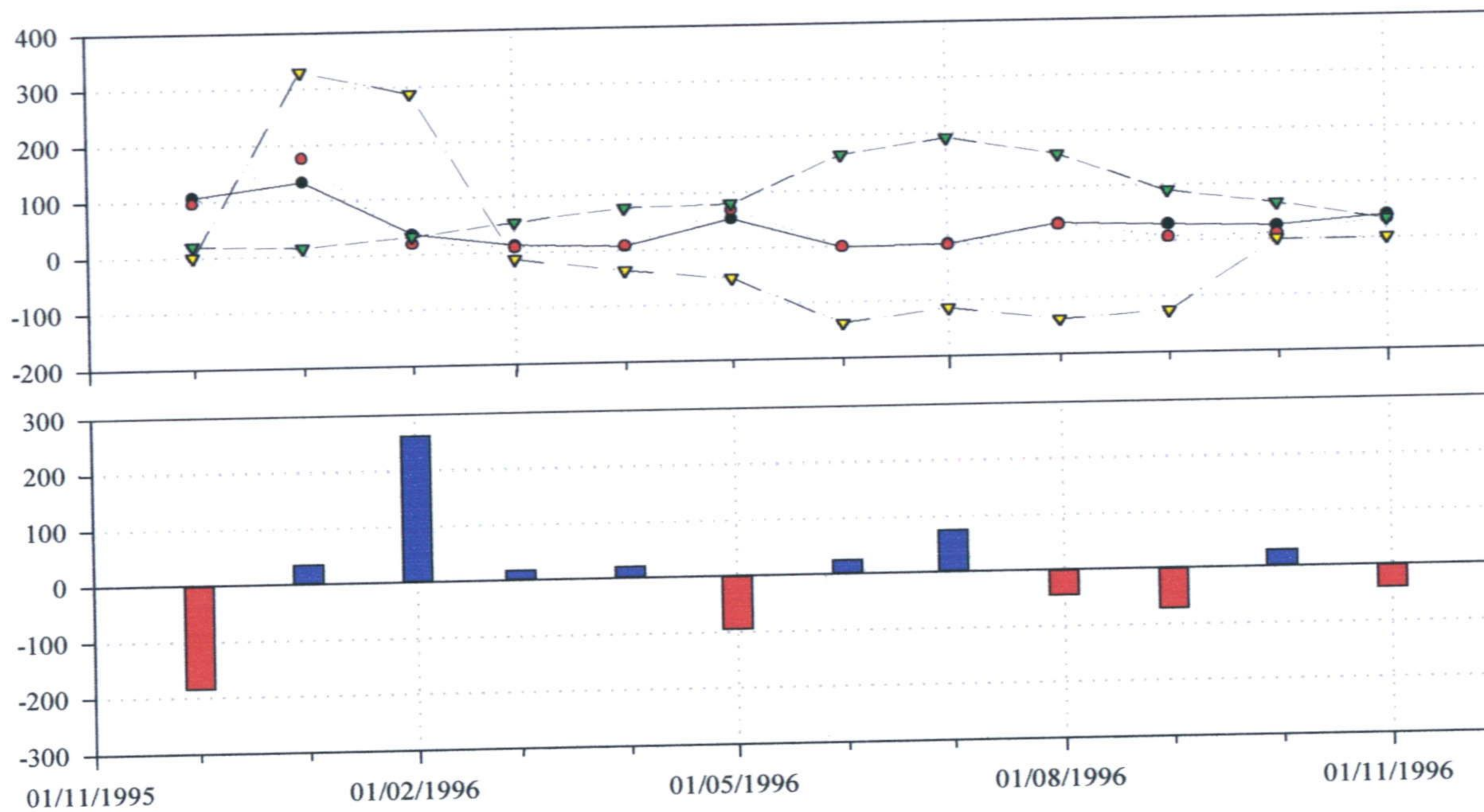


	<i>Ppción (Hm³)</i>	<i>Evap (Hm³)</i>	<i>d H (Hm³)</i>	<i>Q (Hm³)</i>	<i>G (Hm³)</i>
Media	0.0125	0.0538	-0.0002	0.0081	0.0338
Desviación estándar	0.0160	0.0353	0.0772	0.0177	0.0629
Total	0.6500	2.8000	-0.0100	0.4200	1.7600
Mínimo	0.0000	0.0100	-0.1100	0.0000	-0.1100
Máximo	0.0600	0.1200	0.1900	0.0900	0.2300

Figura 3.16. Resultados del balance hídrico realizado en la laguna de la Ratosa

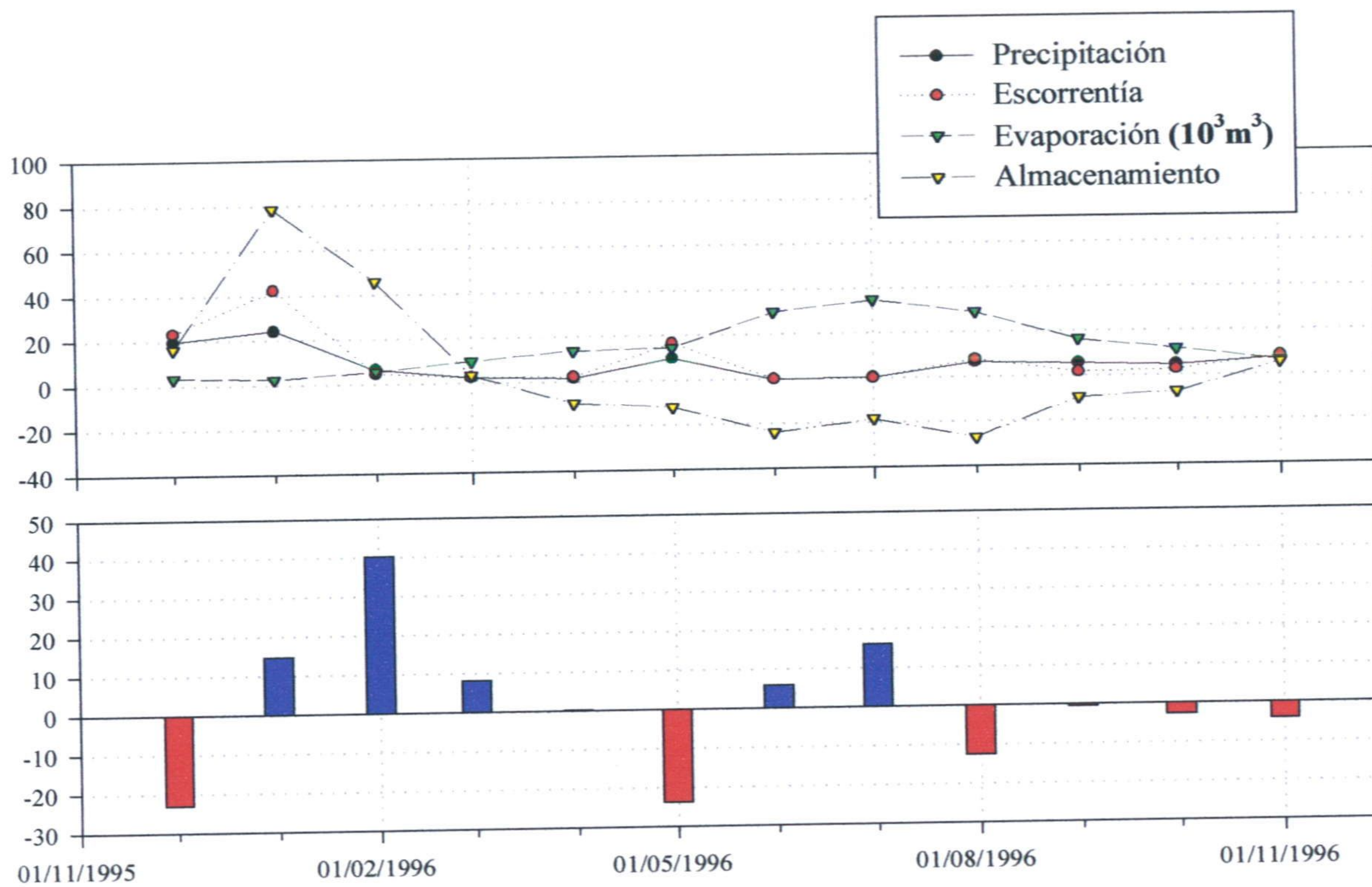


<i>SALADA (10³ m³)</i>	<i>Ppción</i>	<i>Q</i>	<i>Evap</i>	<i>dH</i>	<i>G</i>
Media	9.90	26.79	19.93	4.41	-12.35
Desviación estándar	10.09	36.22	14.60	37.72	34.83
Total	118.77	321.48	239.19	52.92	-148.14
Mínimo	0.00	0.00	3.57	-32.34	-63.96
Máximo	32.63	121.78	46.90	88.20	50.00

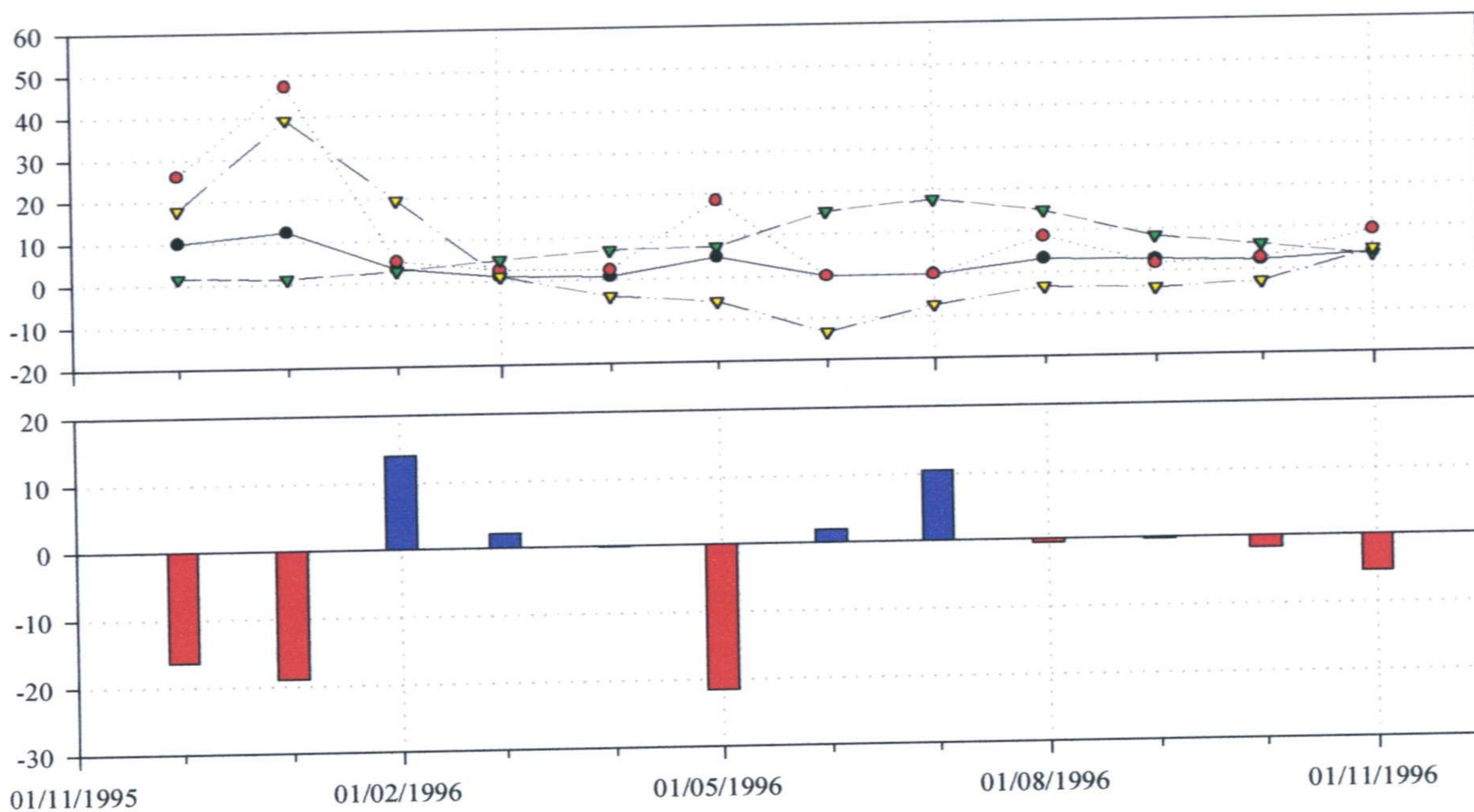


<i>DULCE (10³ m³)</i>	<i>Ppción</i>	<i>Q</i>	<i>Evap</i>	<i>dH</i>	<i>G</i>
Media	40.33	38.64	81.22	0.00	2.25
Desviación estándar	41.09	52.24	59.51	154.41	109.35
Total	484.00	463.64	974.64	0.00	27.02
Mínimo	0.00	0.00	14.56	-137.77	-185.13
Máximo	132.98	175.62	191.11	329.45	263.12

Figura 3.17. I Resultados del balance hídrico y estadísticos básicos del mismo en las lagunas Salada y Dulce



<i>CAPACETE (10³ m³)</i>	<i>Ppcción</i>	<i>Q</i>	<i>Evap</i>	<i>dH</i>	<i>G</i>
Media	7,34	9,30	14,78	3,36	1,50
Desviación estándar	7,48	12,57	10,83	30,87	17,69
Total	88,07	111,59	177,35	40,33	18,02
Mínimo	0,00	0,00	2,65	-27,25	-23,79
Máximo	24,20	42,27	34,78	78,48	40,20



<i>CERERO (10³ m³)</i>	<i>Ppcción</i>	<i>Q</i>	<i>Evap</i>	<i>dH</i>	<i>G</i>
Media	3,77	10,37	7,59	3,50	-3,05
Desviación estándar	3,84	14,02	5,56	14,87	10,99
Total	45,25	124,43	91,12	42,00	-36,56
Mínimo	0,00	0,00	1,36	-13,44	-21,61
Máximo	12,43	47,14	17,87	39,20	13,93

Figura 3.17. II Resultados del balance hídrico y estadísticos básicos del mismo en las lagunas de Capacete y Cerero

Las albuferas de Adra, sistemas costeros formados sobre materiales muy permeables, presentan una dinámica hidrológica diferente al de las lagunas anteriormente comentadas.

Los resultados de los balances se pueden observar en la figura 3.19. Las entradas desde las ramblas de la Estanquera y de las Adelfas en la laguna Honda y los aportes debidos a acequias han resultado ser los componentes de la recarga más importantes, y

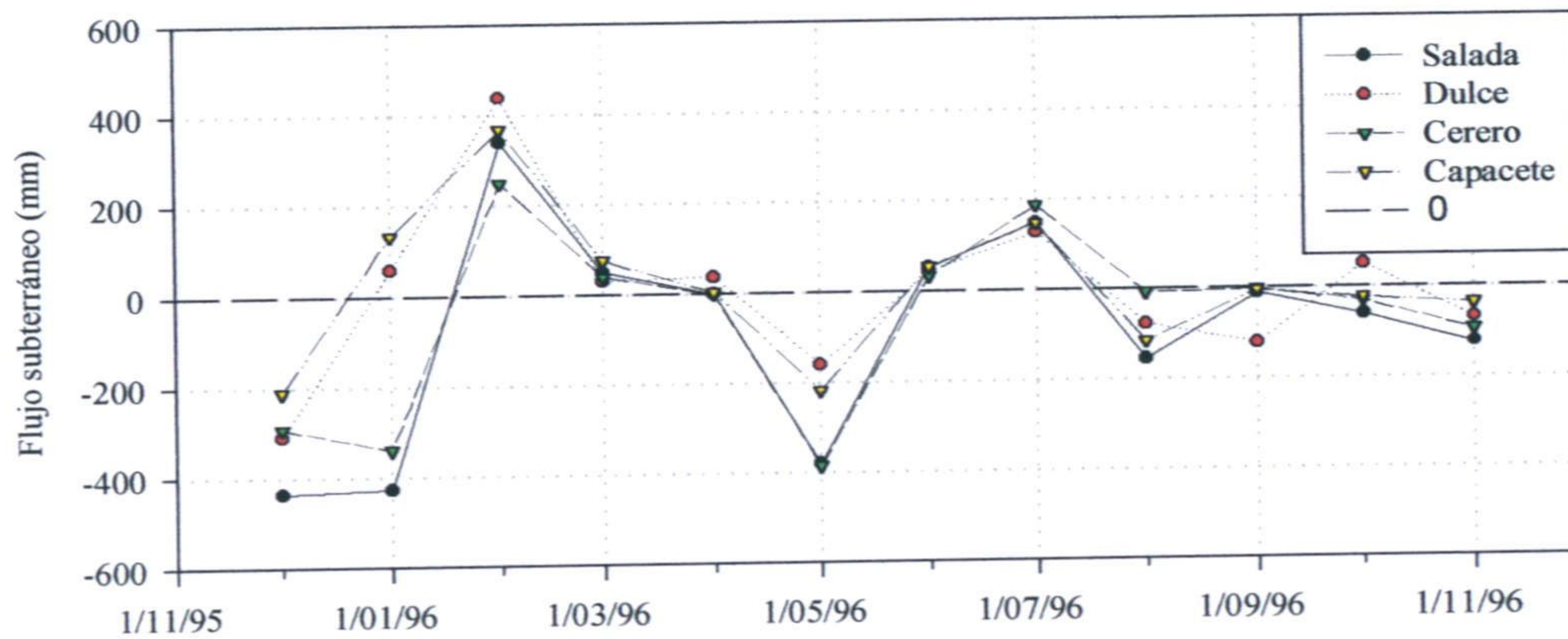


Figura 3.18. Evolución mensual del flujo subterráneo estimado para cada laguna durante el periodo de estudio (1995 - 1996)

decisivos a la hora de interpretar los resultados obtenidos Según estos resultados, la laguna Honda durante el periodo de realización del balance (marzo de 1999 a mayo de 2000), presenta un flujo hacia el acuífero de $328 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, lo cual es coherente con las mediciones de nivel realizadas en los piezómetros. En la laguna Nueva el flujo neto es positivo, de $299 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, lo cual parece implicar que la descarga subterránea de la laguna Honda recarga a la laguna Nueva que, durante el periodo considerado, y de acuerdo con los valores del balance obtenidos, perdería este agua por evaporación, al ser la superficie de agua libre mayor en esta última. Las albuferas influirían en el comportamiento del acuífero del delta del río Adra; en este sector la descarga principal del acuífero hacia el mar no sería muy importante, ya que la evaporación es el principal componente de la descarga.

Los resultados se adaptan a las variaciones del volumen de agua almacenado en las lagunas, por lo que el método se debe considerar como base de un modelo semi-cuantitativo del funcionamiento hidrológico de éstas, y permite conocer la importancia relativa de los distintos parámetros hidrológicos que intervienen en las variaciones del volumen de agua almacenada en las mismas.

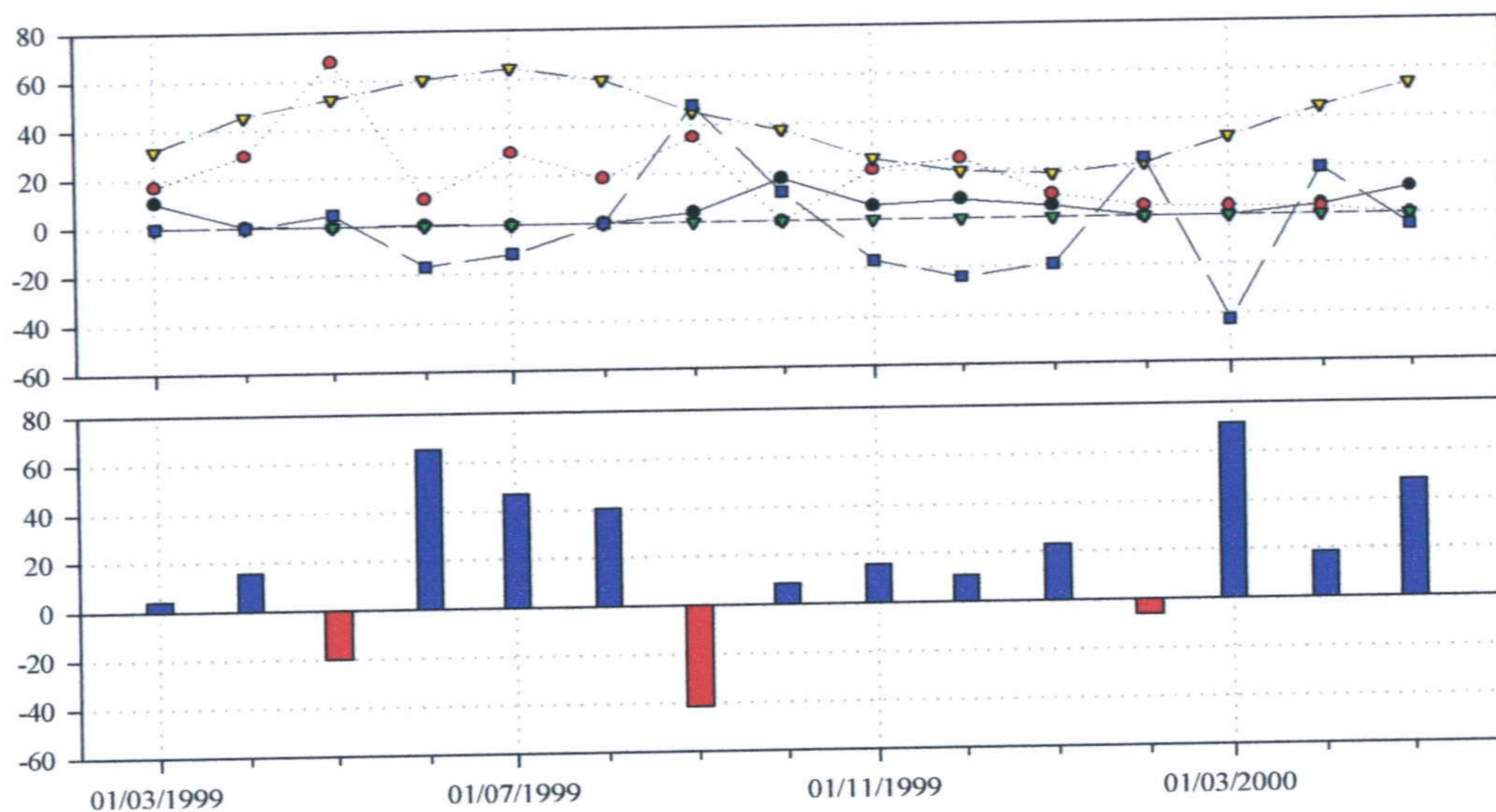
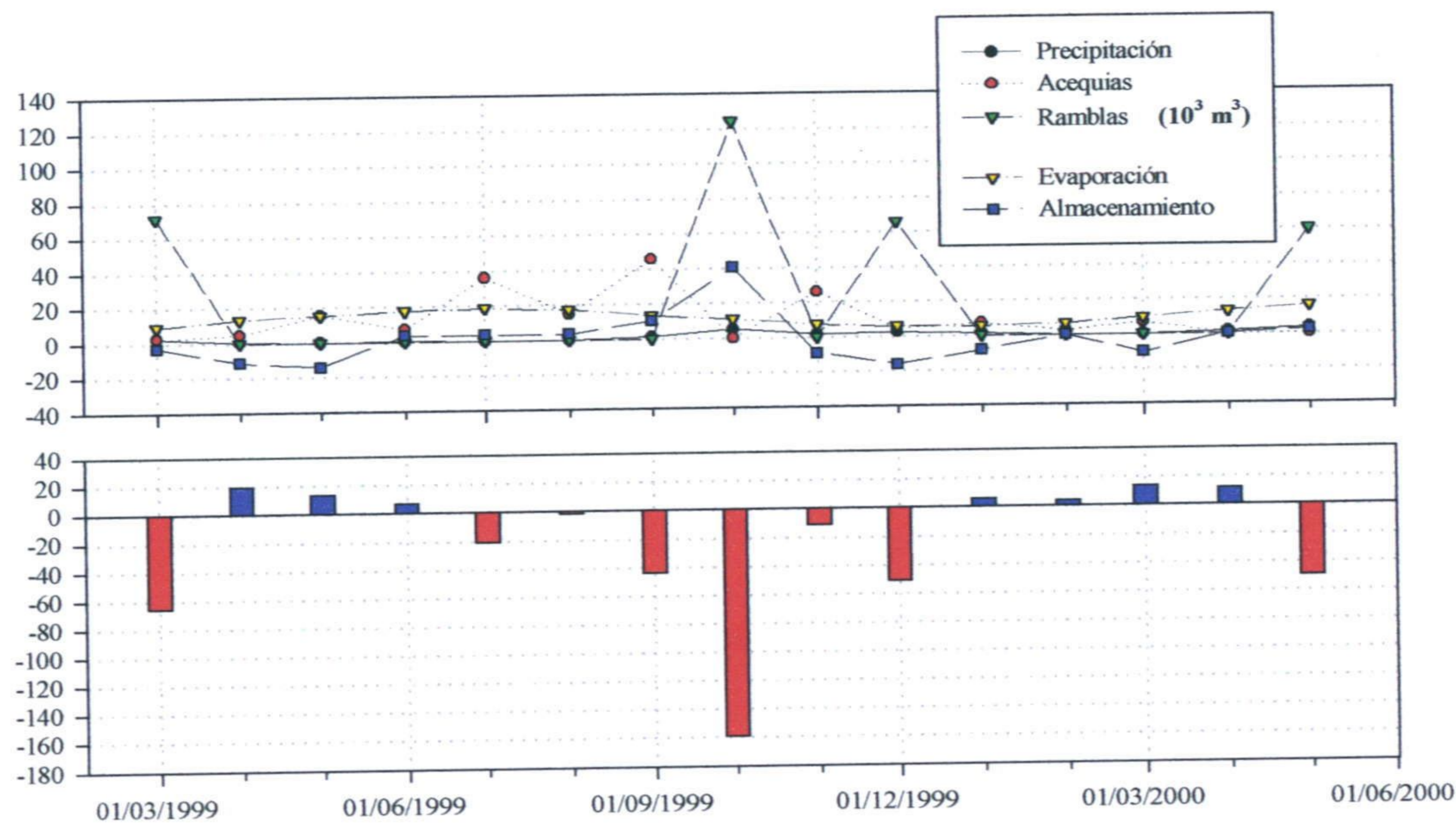


Figura 3.19. Resultados del balance hídrico y estadísticos básicos del mismo en las lagunas Honda y Nueva

3.3. Régimen térmico de las lagunas

3.3.1. Metodología

El estudio de la termoclina, la estabilidad y el balance energético de las lagunas se ha realizado midiendo temperaturas de la columna de agua de los diferentes sistemas, en unos casos con una sonda de conductividad y temperatura WTW, modelo LF 196; y en los casos en los que se decidió realizar un estudio en detalle, con un conjunto de 15 termistores sumergidos y uno de temperatura ambiente asociados a un acumulador (Grant data logger) y programado para tomar medidas horarias o bihorarias. Los datos meteorológicos necesarios para la realización de balances térmicos se han obtenido de estaciones automáticas situadas en las inmediaciones de los sistemas; concretamente, en el caso de las albuferas de Adra la estación estaba situada en la azotea de una casa particular (estación meteorológica Squirrel Mini - Met), y en el caso de las lagunas de Archidona se utilizaron los datos de la estación automatizada de Loja, suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología. Se han elegido estos sistemas por presentar una dinámica térmica muy diferente entre sí.

La situación de la termoclina, en los casos en los que existía, se ha hallado a partir de la temperatura del agua en el eje vertical del centro de los lagos. Tradicionalmente se considera que la termoclina se localiza en el punto medio de la zona de máximo gradiente, este punto coincide con los máximos de N^2 (frecuencia de Brunt - Väisälä) como veremos a continuación.

Los resultados de estabilidad de la columna de agua se han obtenido mediante el tratamiento informático de los datos con el programa SisDel 1.0 (Rodríguez da Silva, 2000), para automatización de los cálculos de estabilidad térmica y mezcla en lagos; en el primer caso se ha seguido el modelo de Idso (1981), según el cual:

$$S = \frac{1}{A_0} \int_{z_m}^{z_0} (\rho z - \rho) (Az) (z - z\rho) dz$$

Siendo:

A_0 = Área superficial (cm^2)

Az = Área a la profundidad Z (cm^2)

ρ = Densidad media que resultaría de mezclar el lago hasta la uniformidad térmica (g/cm^3)

ρz = Densidad a la profundidad z

$z\rho$ = profundidad a la que el agua tiene una densidad ρ , antes de la mezcla

Z_m = Máxima profundidad (cm)

Z_0 = Superficie

Para el estudio de la mezcla se ha utilizado el cuadrado de la frecuencia de Brunt - Väisälä (N^2), que representa la frecuencia de oscilación de una capa de agua que es desplazada desde su posición de equilibrio en un fluido estratificado; cuanto mayor es la estratificación, mayores son la oscilación y la frecuencia, con lo cual se obtiene una indicación de la facilidad o dificultad que tiene el agua de una profundidad a mezclarse con el agua situada por encima o por debajo de ella (Reynolds, 1993; Catalán, 1987).

$$N^2 = (g/\rho) (d\rho/dz)$$

Siendo:

N^2 = Cuadrado de la frecuencia de Brunt - Väisälä (s^{-2})

$d\rho/dz$ = Gradiente de densidad entre 2 profundidades ($g/cm^3 m$)

ρ = Densidad media de la capa de agua considerada (g/cm^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

En ambos casos, la densidad del agua se ha obtenido a partir de la temperatura según el método de Krambeck:

$$\rho = 0.999869 + 6.67413 \cdot 10^{-5}T - 8.85556 \cdot 10^{-6}T^2 + 8.23031 \cdot 10^{-8}T^3 - 5.51577 \cdot 10^{-10}T^4$$

Para la realización del balance térmico es necesario conocer los aportes energéticos del exterior, en forma de radiación luminosa, térmica y, en general, las variables que informen sobre cambios de estado energéticos entre la superficie del lago y el exterior. Ésto puede conocerse por medio de variables meteorológicas (temperatura, radiación, velocidad del viento y humedad relativa) y una serie de formulas empíricas que ajustan los términos de la denominada *ecuación del balance térmico*. Para un determinado intervalo temporal el intercambio neto de calor (H_{neto}) entre el sistema y su entorno viene definido por la ecuación (Armengol, 2000),

$$H_{neto} = H_{sa} + H_{la} + H_{le} + H_e + H_c \quad (1)$$

H_{neto} = Intercambio neto de calor (positivo, el sistema absorbe energía)

H_{sa} = Radiación solar absorbida

H_{la} = Radiación de onda larga absorbida

H_{le} = Radiación de onda larga emitida

H_e = Flujo de calor latente (evaporación/condensación)

H_c = Flujo de calor sensible (convección)

Estos términos son positivos cuando penetran en el sistema y negativos cuando salen del mismo. Se han omitido tres términos del balance cuyo efecto no se ha considerado significativo para introducirlo en la ecuación (1). Son los siguientes: 1) H_p , el calor aportado por la precipitación sobre la superficie del agua, que no se ha considerado habida cuenta la relativamente baja precipitación en las zonas de estudio, 2) H_{cu} , que es el intercambio de calor entre las paredes y el fondo con el agua del sistema; este término no se suele tener en cuenta en sistemas con profundidad mayor de 3 m y 3) H_f , que es el flujo de calor por advección, o entradas/salidas, que no se ha tenido en cuenta debido a que en la mayoría de las cuencas de las lagunas no hay afluentes ni efluentes definidos. Los términos de la ecuación (1) constituyen lo que se denomina balance superficial de calor y es la base de la mayoría de modelos matemáticos que simulan el comportamiento ecológico y de calidad de aguas de ecosistemas lacustres. El balance térmico se ha calculado para datos bihorarios debido a que, como ocurre en cualquier modelo, el efecto de escala es decisivo para la interpretación de los resultados. De otra forma, el error en estos cálculos sería importante debido a la variabilidad diaria que presentan variables meteorológicas como la temperatura del aire, la velocidad del viento o la radiación. La metodología está basada en su mayor parte en las fórmulas empíricas utilizadas para el embalse del Sau, Cataluña (Armengol, 2000), ya que están calibradas para un sistema acuático en latitudes semejantes. La variable H tiene dimensiones de energía dividido por superficie y tiempo, por lo que las unidades en que se expresan sus valores son W/m^2 .

La (H_{sa}) "radiación solar absorbida" corresponde a la región del espectro entre 0.3 y 3 μm , que comprende una pequeña parte de la radiación ultravioleta, toda la visible y parte de la infrarroja (cercana). La radiación solar que es absorbida efectivamente por la superficie lacustre (H_{sa}) es igual a la que llega a dicha superficie (H_{so}) en un día sin nubes por la fracción que representa lo que no se refleja de nuevo ($1-A$, siendo "A" el albedo). Este término debe posteriormente corregirse por el efecto de las nubes, $f(C)$, siendo "C" la fracción de cielo cubierta por nubes ($0 - 1$). En definitiva,

$$H_{sa} = H_{so} (1-A) f(C) \quad (2)$$

la ecuación (2) puede quedar simplificada a:

$$H_{sa} = H_{soc} (1-A) \quad (3)$$

donde H_{soc} es la radiación medida directamente con un piranómetro. Con la metodología utilizada se ha seguido la fórmula (3), ya que se disponía de piranómetro. La radiación que llega a la superficie (H_{so}) se calcula siguiendo el método del coseno, en función de la altura (z), el día juliano (J) y la latitud (L).

$$H_{so} = (31.54 - 0.274L + 0.0007813z) + (-0.2986 + 0.2678L + 0.0004102z) * \cos(2\pi/365 - C) \quad (4)$$

considerando $C = 2.92$

El factor $f(C)$ se obtiene a partir de datos de cobertera de nubes ($C = 0 - 1$), asumiendo que $C = 1$ es un día completamente cubierto y $C = 0$, un día despejado. Según esto,

$$f(C) = (1 - 0,507C^{0,967}) \quad (5)$$

la ecuación (5) (Armengol, 2000) está calibrada para datos de radiación y de cobertera de nubes; así, con datos de H_{so} y de H_{soc} , se han hallado los coeficientes a y b de la ecuación general:

$$H_{soc} = H_{so} (1 - aC^b) \quad (6)$$

El albedo (A) se define como la relación entre la radiación reflejada desde una superficie y la radiación total incidente. Este valor, para el agua, toma valores en un rango que está comprendido entre un mínimo de 0.02 y un máximo de 0.5 (Burman y Pochop, 1994), suele asignarse un valor intermedio, pero el albedo varía en función de la declinación solar, el efecto de oleaje, o la nubosidad; se ha calculado el albedo siguiendo la fórmula de Henderson - Sellers (1986):

$$A = a_0 / (a_0 + \text{seno } \phi) \quad (7)$$

en la que a_0 es un parámetro función de la cobertera de nubes (C) y el día juliano (J); y ϕ es la media diaria de elevación del sol, ó ángulo zenital solar,

$$a_0 = 0.02 + 0.01 (0.5 - C)(1 - \text{seno } ((\pi ((J-81)/183))) \quad (8)$$

y

$$\text{coseno } \phi = \text{seno } L \text{ seno } \delta + \text{coseno } L \text{ coseno } \delta \text{ coseno } w_h \quad (9)$$

para L , latitud; δ , declinación, calculada según el método de Burman - Jacquot (Burman y Pochop, 1994) y w_h el ángulo solar medio diario al atardecer.

Con estos datos, y según la ecuación (2), se ha podido calcular el primer término (radiación de onda corta, o solar, absorbida) de la ecuación del balance térmico (1) diario.

"Radiación de onda larga" (H_{la} , H_{le}). El aire emite radiación de onda larga en función de su temperatura, radiación que es absorbida por el sistema (lago, embalse). Por su parte, el agua también es un emisor de radiación de onda larga, que en este caso pierde el sistema. Mientras que el agua se comporta como un "cuerpo negro", el aire se

comporta como un “cuerpo gris”; en ambos casos la radiación emitida es función de la temperatura y puede calcularse según la ecuación de Stefan – Boltzmann, modificada por una serie de factores que dependen de las características de cada medio. Una parte importante de la energía solar que llega a las capas altas de la atmósfera es absorbida por algunas de las sustancias presentes en ella, especialmente por el vapor de agua. Esta radiación es reemitida en forma de calor y llega a la superficie en cantidades variables en función de la temperatura, la humedad, el espesor de la atmósfera, etc., que en conjunto determinan lo que se conoce como emisividad de la atmósfera. La emisividad se calcula de manera indirecta a partir de algunas de las variables anteriores y se han propuesto diversas fórmulas para hacerlo; en este trabajo se utiliza la relación de Idso (1981), ya que combina de manera adecuada la humedad atmosférica a partir de la presión de vapor de agua y la temperatura como valores más importantes. Al igual que en el caso de la radiación solar, las nubes modifican la cantidad de radiación mediante una relación semejante a la que se ha utilizado anteriormente (5), aunque en este caso las nubes aumentan, en lugar de disminuir, la radiación de onda larga que llega a la superficie, por efecto pantalla (Armengol, 2000). La radiación de onda larga absorbida por el sistema se ha calculado a partir de la siguiente fórmula,

$$H_{la} = (1 - A) \sigma T_a^4 \epsilon_0 f(C) \quad (10)$$

en la que A es el albedo diario ya comentado, σ es la constante de Stefan – Boltzmann ($5.57 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$), T_a^4 es la temperatura absoluta del aire ($^{\circ}\text{K}$) elevada a la cuarta potencia, $f(C)$ es el ya mencionado factor de nubosidad y ϵ_0 es la emisividad atmosférica, calculada a su vez mediante la ecuación (Idso, 1981),

$$\epsilon_0 = 0.723 + 4.19 \cdot 10^{-4} e_a \exp(1500/T_a) \quad (11)$$

en la cual, e_a , presión de vapor de agua en la atmósfera, se calcula mediante la ecuación de Richards (1971),

$$e_a = 101.325 \exp(13.3185 t_k - 1.97 t_k^2 - 0.6445 t_k^3 - 0.1229 t_k^4) \quad (12)$$

con

$$t_k = (373.15/T_a) \quad (13)$$

La “radiación de onda larga” (H_{le}) emitida por el sistema se calcula de manera semejante a la absorbida, mediante la ecuación

$$H_{le} = \sigma T_w^4 \epsilon_w \quad (14)$$

asumiendo, en este caso, un valor constante para la emisividad, de 0.96 (Bonnet, 2000), y siendo T_w la temperatura absoluta de la superficie del agua.

El “flujo de calor latente” (H_e) es un flujo energético que constituye, en sí mismo, un balance, ya que mide la cantidad de energía resultado de dos procesos, la evaporación y la condensación. Por esta razón, el signo indica el sentido de la transferencia energética: es negativo si predomina la evaporación y positivo si predomina la condensación. El método empleado para calcularlo se basa en aproximaciones empíricas (Colomer *et al.*, 1996; Armengol, 2000),

$$H_e = - f_e (e_w - e_a) \quad (15)$$

donde f_e es una función de transferencia empírica (Colomer y Casamitjana, 1993; Armengol, 2000), basada en la temperatura del aire, del agua y la velocidad del viento (u_{12}) a 12 m del suelo, en m/s.

$$f_e = 4.8 + 1.92 u_{12} + (T_w - T_a) \quad (16)$$

Por su parte, e_w y e_a son las presiones parciales de vapor de agua en el agua y en la atmósfera, respectivamente; estos dos parámetros se calculan (12) mediante la ecuación de Richards (1971). Para ello se considera que $e_w = e_a$, se utiliza el valor de T_w en lugar de T_a en la ecuación (13) y, por otra parte, se admite que $e_a = e_a(12) h_r$, donde h_r representa la humedad relativa.

El "flujo de calor sensible" (H_c), es la fracción intercambiada entre el agua y la atmósfera por conducción molecular y turbulenta cuando hay movimiento de uno o de ambos fluidos. Al igual que en el caso del calor latente, se utilizan fórmulas empíricas, en concreto,

$$H_c = - 0.63 f_e (T_w - T_a) \quad (17)$$

siendo 0.63 la relación de Bowen (mbar K^{-1}), y f_e es la función de transferencia (16).

La "radiación neta intercambiada" (H_{neta}) es la suma de todos los elementos que se han definido en la ecuación (1), y el resultado del balance la suma, a su vez, de todos los valores obtenidos para cada intervalo temporal.

3.3.2. Termoclina

La estructura térmica de un lago o embalse está determinada, en primer lugar, por el balance energético, resultado del intercambio de energía entre el lago y el exterior (atmósfera, cuenca del lago). Este intercambio se produce fundamentalmente a través de la superficie del mismo (Hoyos, 1997). En segundo lugar está determinada por la hidrodinámica del sistema, que determina la estructura térmica vertical. Obviamente, en el primer caso tendremos que conocer los aportes energéticos del exterior. En el segundo caso, para conocer la hidrodinámica del sistema, tendremos que tener información de la temperatura en el seno del mismo, es decir, el perfil térmico vertical del lago, a lo largo del tiempo.

El calor que absorbe un cuerpo de agua proviene, fundamentalmente, de las radiaciones de onda larga que llegan a su superficie. Al igual que la luz, el calor se absorbe en profundidad de manera exponencial, y el coeficiente de extinción del calor es mayor, en uno o dos órdenes de magnitud, que el de la luz, con lo que la radiación calorífica se absorberá, en un cuerpo de agua estático, en los primeros 2 m de la columna de agua. Posteriormente el calor se propaga hacia las capas inferiores por conducción y, sobre todo, por la turbulencia de agua. La turbulencia es provocada por el viento y su efecto puede llegar al fondo del lago produciendo una mezcla completa del agua si la columna tiene una densidad homogénea; este hecho dependerá en gran medida de la profundidad del lago, de modo que en los lagos someros (3 m o menos) el agua puede estar permanentemente mezclada. Si aumenta la temperatura de la capa superficial, la diferencia de densidades produce una estratificación y debajo de esta capa el gradiente térmico es elevado en un tramo de la columna de agua, lo que aumenta la estabilidad hidrostática. La zona de alto gradiente se denomina termoclina; bajo ella la acción del viento es prácticamente despreciable.

En la mayoría de las lagunas estudiadas, debido a su escasa profundidad, no se desarrollan termoclinas bien definidas. La acción del viento mezcla toda la columna de agua, homogeneizándola, hecho que caracteriza a las lagunas denominadas polimícticas (Cole, 1983), en las que es más importante el efecto diario de calentamiento de las capas superiores que los cambios estacionales.

A la vista de los perfiles térmicos establecidos en las campañas realizadas, las lagunas de Campillos, Ratosa, Guadalhorce y Antequera son polimícticas. Las únicas lagunas en las que se ha detectado una termoclina bien definida han sido las lagunas

Grande y Chica de Archidona (figura 3.20. y 3.21.). En la laguna Grande la termoclina se forma a partir del mes de abril o mayo, según el año, y se sitúa a unos 5 m de profundidad; esta termoclina se rompe en octubre. La temperatura del agua en invierno no suele alcanzar valores inferiores a los 6 °C y en ningún momento se llega a helar la capa superficial o se forma una termoclina invernal, por lo que este lago se clasifica como monomítico cálido, o de la zona templada. La termoclina separa una zona superior o, epilimnion, de aguas cálidas y menos densas, de otra inferior, o hipolimnion, de aguas frías y algo más densas.

La laguna Chica de Archidona (figura 3.21.) presenta una estratificación menos definida que la anterior y no es completa en toda la cubeta debido a sus características morfométricas, anteriormente comentadas. En esta laguna, los valores de conductividad eléctrica del agua muestran un incremento hacia los 6 m de profundidad, lo que permite diferenciar dos estratos: uno menos denso, con valores en torno a los 4 mS/cm, y otro de conductividad mucho más elevada, que llega a ser hasta de 16 mS/cm en las proximidades del fondo. Esta diferencia, que se mantiene a lo largo de todo el ciclo estudiado en la parte central de la laguna, permite calificarla como meromítica (figura 3.22.); estas lagunas se denominan así por la existencia de una capa profunda, de aguas muy densas y saladas (monimolimnion), separada por una quimioclina de la capa suprayacente, en la que se distinguen periodos de estratificación estival y mezcla invernal (mixolimnion). En el incremento de temperatura que se observa en el monimolimnion es probable que jueguen un papel relevante tanto procesos físicos (absorción de radiación solar) como biológicos (descomposición anaerobia de la materia orgánica).

Si observamos la evolución de la temperatura en ambas lagunas durante los periodos en que estuvieron instalados los termistores (figura 3.23.), se observa cómo en el periodo estival las diferencias térmicas son más acusadas entre el fondo y la superficie que en invierno, cuando la columna de agua tiene temperatura homogénea.

El resto de las lagunas del presente estudio, como ya se ha señalado, no presentan una estratificación térmica tan evidente como las anteriores, si bien en algún caso se han detectado periodos en que las variaciones de temperatura en profundidad sugieren la existencia de una cierta estratificación térmica, como en las albuferas de Adra, en las que durante el verano las diferencias térmicas superficie – fondo llegan a ser de entre 4 y 6 °C. La termoclina durante este periodo (que dura hasta mediados de otoño) se sitúa a unos 60 cm de profundidad en la laguna Honda y a unos 110 cm en la Nueva.

Se han detectado termoclinas secundarias en las lagunas en que se ha dispuesto de datos de temperatura de la columna de agua horarios o bihorarios (lagunas Grande y Chica de Archidona, y laguna Honda de Adra); en todos los casos, independientemente de la época de año y de que existiese estratificación principal o no, se han formado termoclinas secundarias diarias, e incluso termoclinas secundarias inversas en invierno (laguna Grande de Archidona). Tan sólo en los días lluviosos, o con mucho viento, se rompe esta dinámica (figura 3.28., estabilidad en la laguna Honda).

3.3.3. Estabilidad de la columna de agua

Los índices que se han utilizado para estudiar la estabilidad de la columna de agua en las lagunas Grande y Chica de Archidona y Honda de Adra han sido dos: el primero la estabilidad (S) en g-cm/cm^2 (Idso, 1973), que mide el trabajo que se

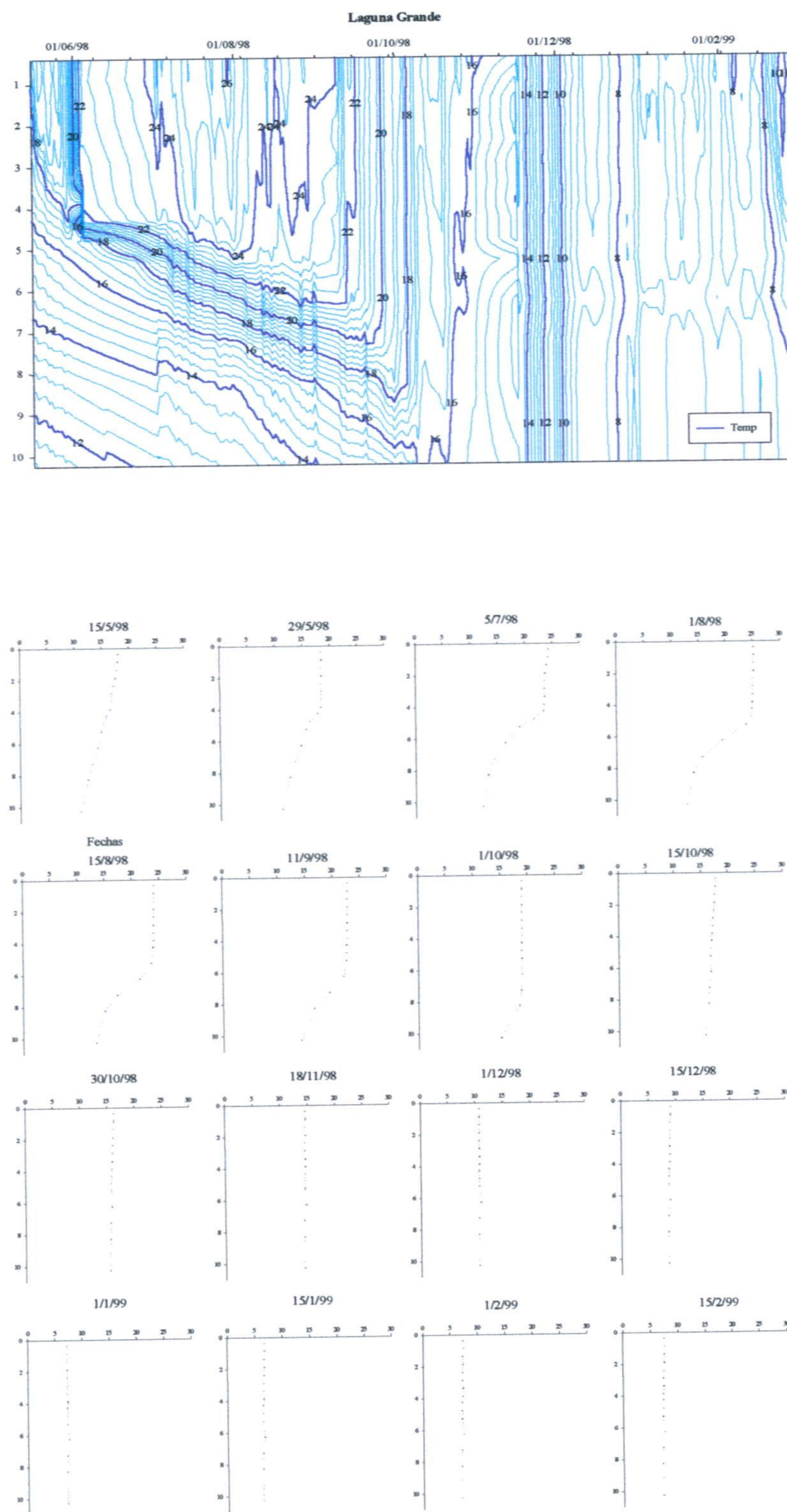


Figura 3.20. Variación de la temperatura con el tiempo y la profundidad en la laguna Grande

requeriría para mezclar la columna de agua hasta una densidad uniforme, sin añadir o sustraer calor en el proceso. El segundo índice que se ha utilizado ha sido el cuadrado de la frecuencia de Brunt - Väisälä (N^2), en s^{-2} .

En la figura 3.24. se pueden observar los perfiles bihorarios de frecuencia de Brunt - Väisälä para dos fechas (14/6/98 y 20/6/98), y la estabilidad y comportamiento térmico a distintas profundidades, con el mismo intervalo de medida, durante el periodo 9/6/98 a 22/6/98 en la laguna Chica de Archidona. Las N^2 a lo largo del día 14/6/98 se han representado en las dos primeras gráficas; en la gráfica de la izquierda se observa la evolución desde las 0 horas hasta las 10 horas, y en ella puede apreciarse que la mayor

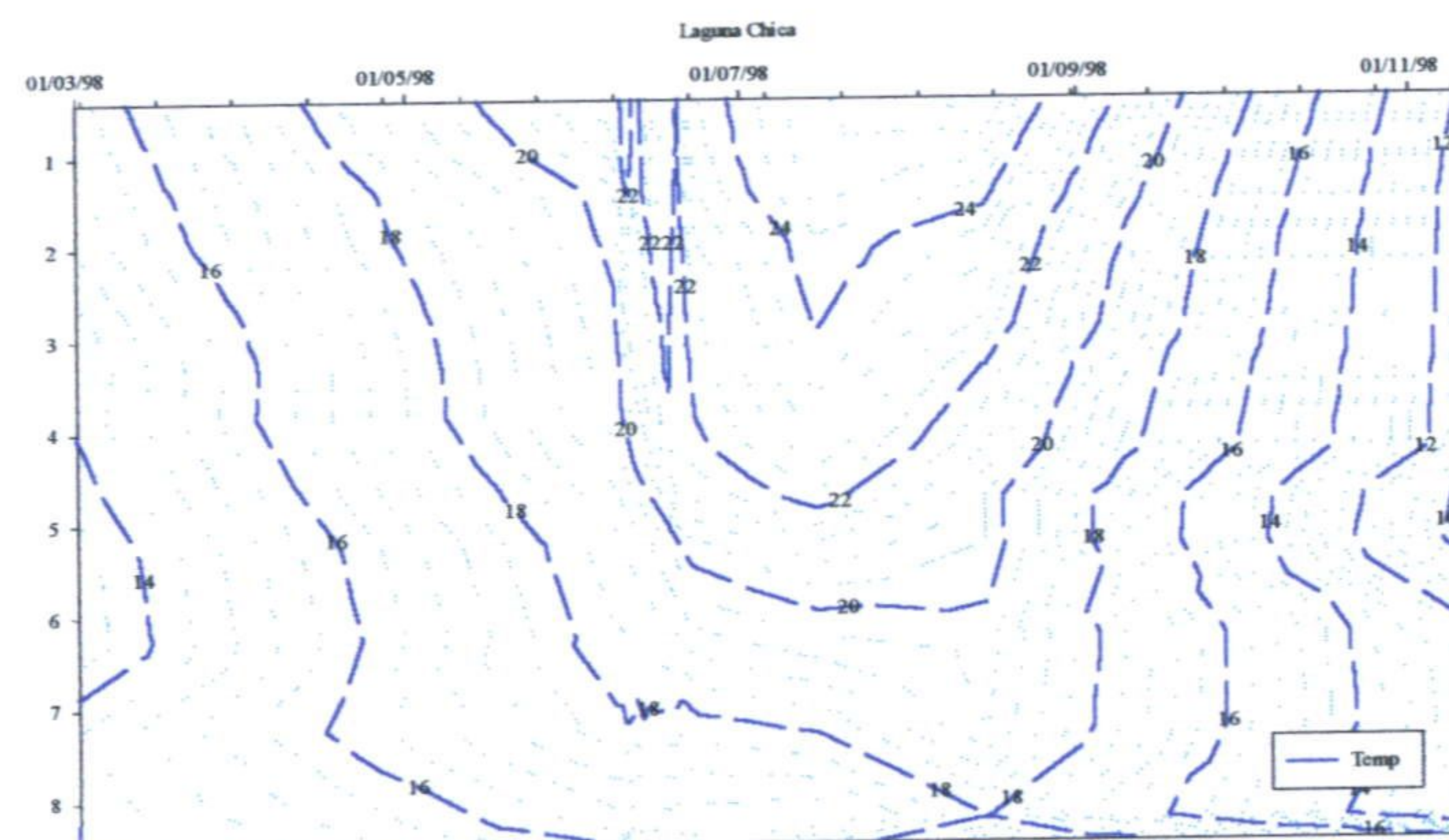
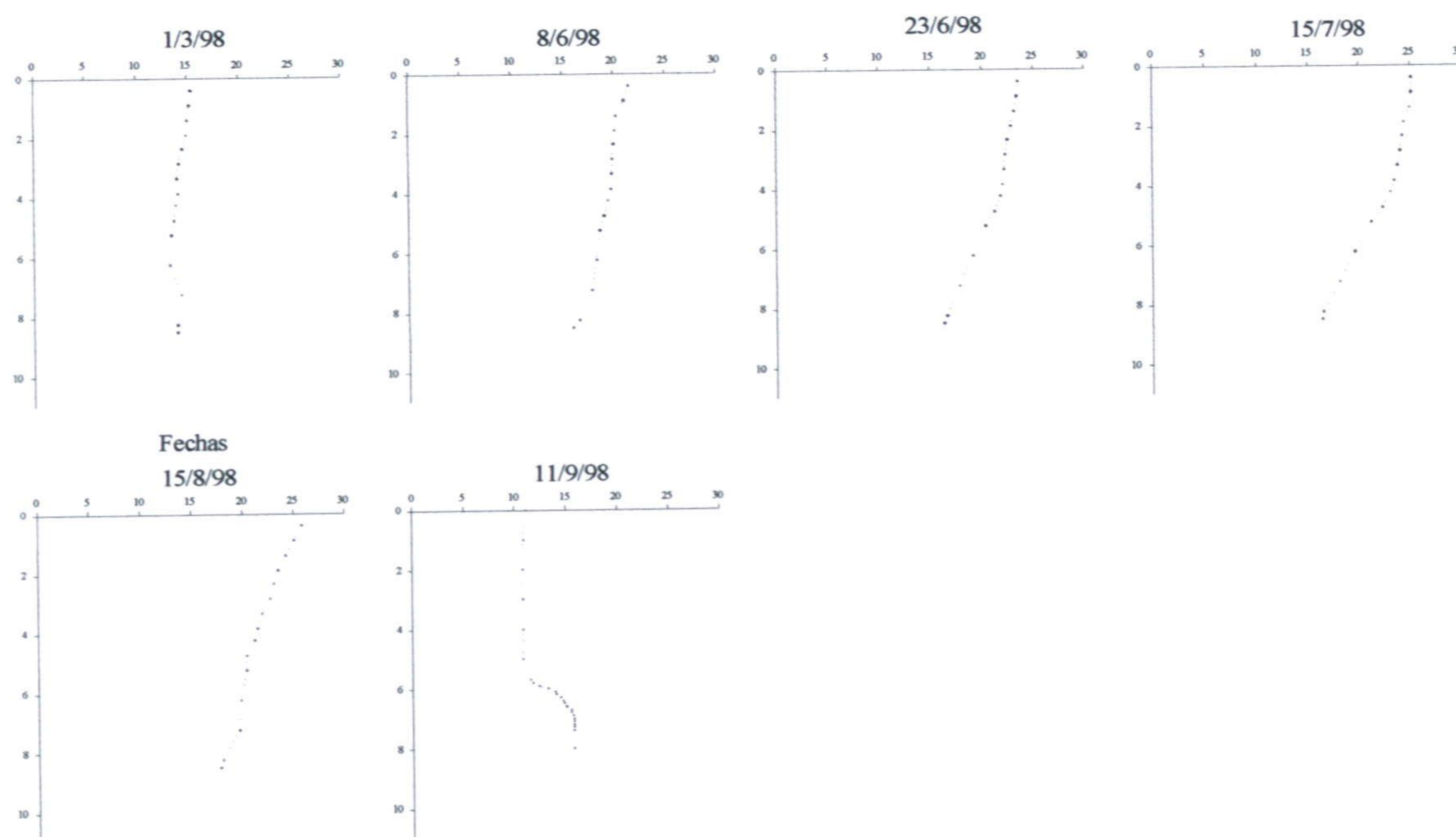


Figura 3.21. Variación de la temperatura con el tiempo y la profundidad en la laguna Chica

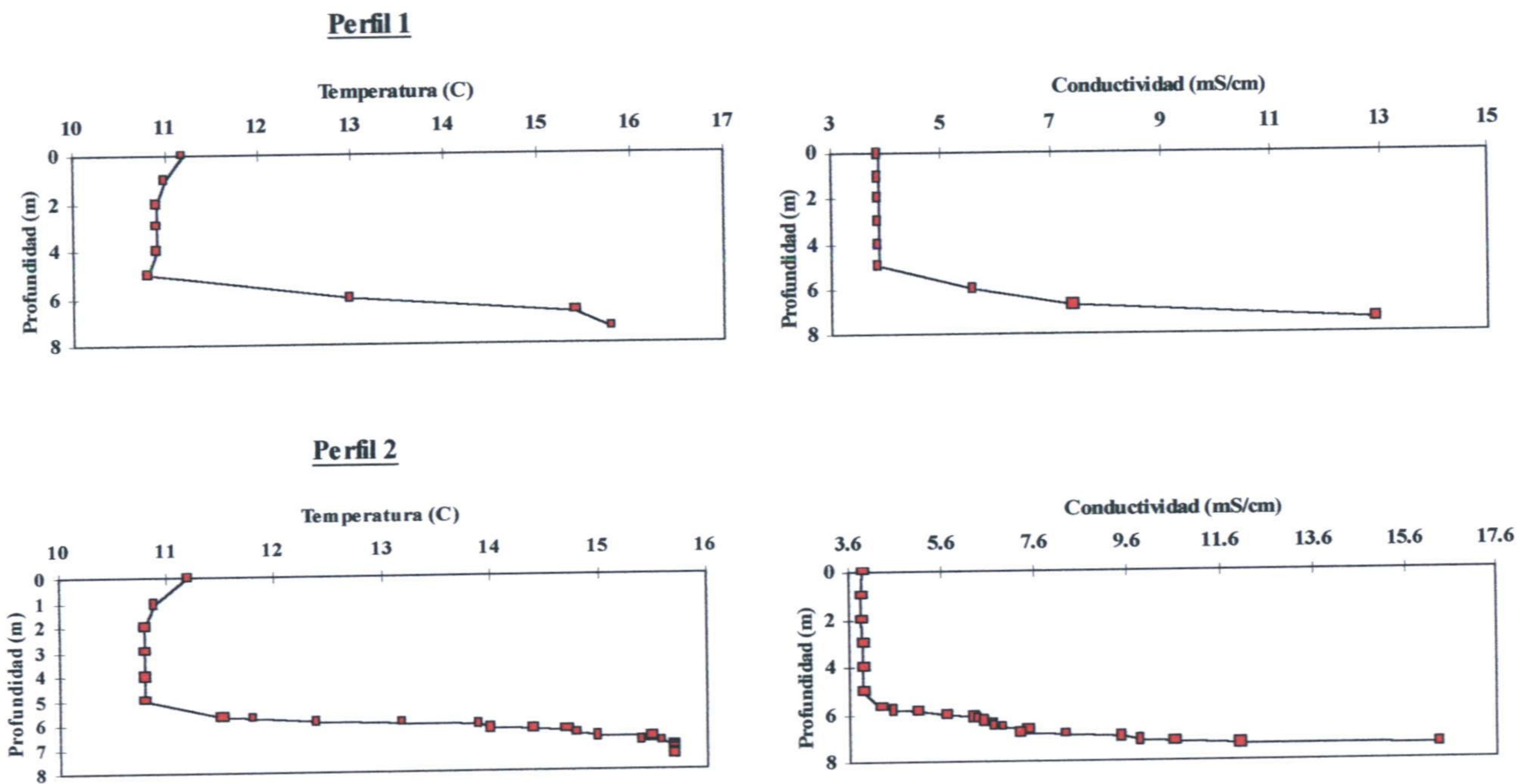


Figura 3.22. Perfiles de C.E. del agua y temperatura en la laguna Chica de Archidona realizados el 15/8/1998

parte de la estabilidad, que durante esas horas es menor de 10 g-cm/cm^2 , es debida a una termoclina principal (el periodo de medidas comienza al inicio de la etapa de estratificación de este lago), que se sitúa a 5 m de profundidad. Los valores de frecuencia de Brunt - Väisälä alcanzan, a dicha profundidad, algo más de $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-2}$. Durante el día, la radiación solar va calentando la capa superficial, lo que da lugar a una termoclina secundaria que se rompe a lo largo de la tarde y cuya profundidad está a menos de 1 m de profundidad; a las 14 h la frecuencia a esta profundidad alcanza $10 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-2}$, y la estabilidad total algo más de 15 g-cm/cm^2 . Se ha elegido este día por ser el que presenta una mayor estabilidad total del periodo considerado. El 20/6/98 es el que presenta una menor estabilidad, que se mantiene en torno a 5 g-cm/cm^2 durante todo el día; en la gráfica de frecuencia de Brunt - Väisälä se aprecia cómo no se forma termoclina secundaria bien definida en esta fecha, posiblemente como consecuencia de vientos fuertes que mezclan el agua de las capas superiores durante el día. Por otra parte, la intensidad de estos vientos no es suficiente para romper la termoclina principal, que alcanza valores de frecuencia de Brunt - Väisälä más altos que en la anterior fecha comentada ($7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ a las 4 h). De estos resultados se infiere que, aún en sistemas estratificados, las termoclinas secundarias confieren durante el día una estabilidad en las capas superiores que influyen en la estabilidad total.

En las figuras 3.25. y 3.26. se observa la evolución térmica y de estabilidad, y la frecuencia de Brunt - Väisälä en la laguna Grande de Archidona desde el 16/5/98 al 27/2/99, con frecuencia de medida bihoraria. Durante este periodo (figura 3.25.) se aprecian dos etapas bien diferenciadas; en la primera de estas etapas se aprecia una estabilidad elevada, desde mayo de 1998 hasta octubre del mismo año, periodo en el que el valor máximo de estabilidad fue de 143 g-cm/cm^2 durante el mes de agosto; en septiembre se produce un descenso desde 70 a 10 g-cm/cm^2 y en octubre el lago es isoterma ($10/10/98$: estabilidad 0 g-cm/cm^2), aunque en días posteriores, y debido a un aumento de la temperatura ambiente, se vuelve a estratificar durante dos pequeños periodos; en noviembre, diciembre y enero el lago permanece mezclado y a partir del 18 de febrero comienza a formarse la termoclina principal.

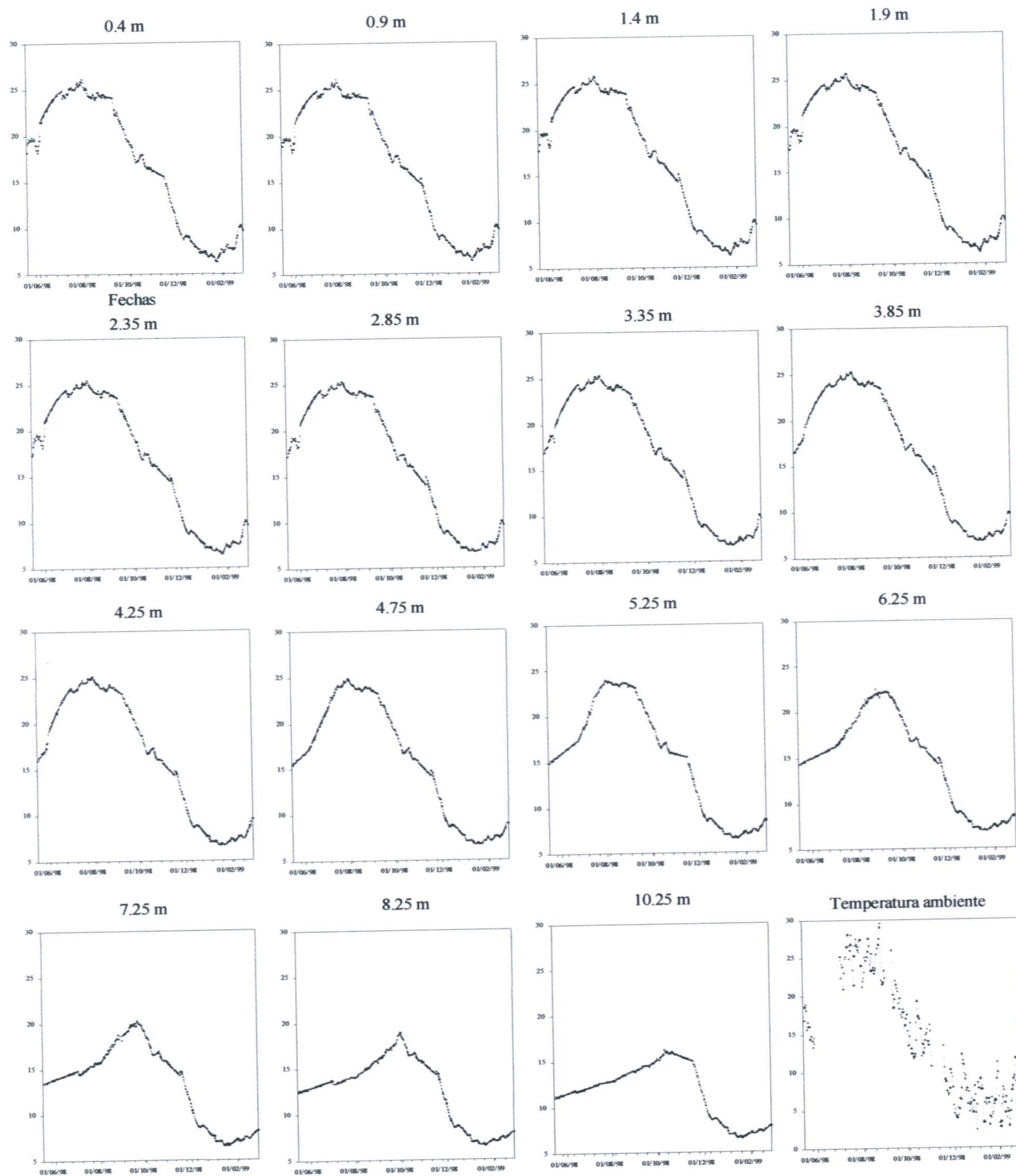


Figura 3.23. (I) Evolución de la temperatura en cada uno de los termistores en la laguna Grande desde el 16/5/98 al 27/2/99

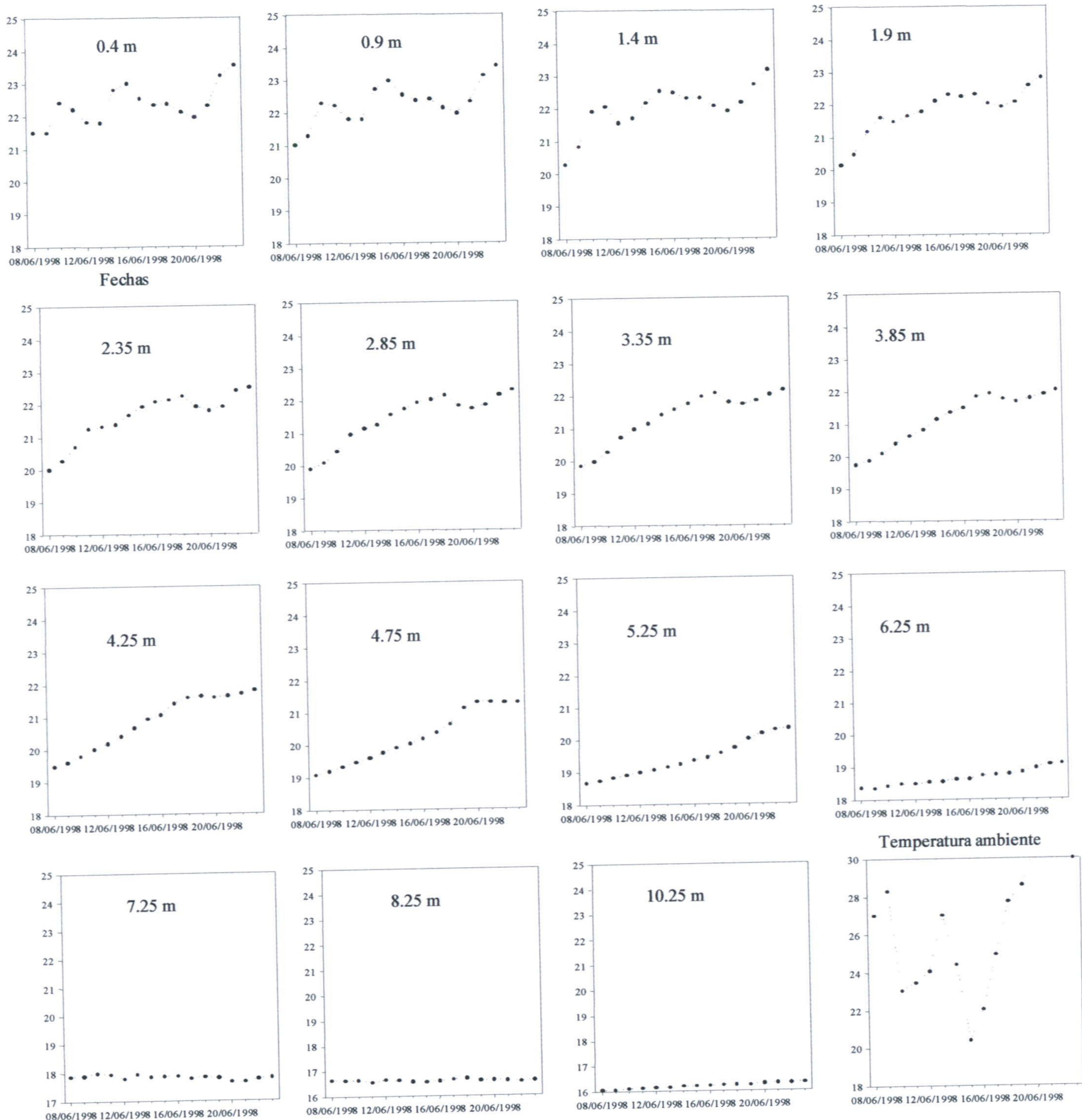


Figura 3.23. (II) Evolución de la temperatura en cada uno de los termistores en la laguna Chica desde el 9/6/98 al 23/6/98

Las termoclinas secundarias contribuyen a incrementar la estabilidad total, de forma que ésta aumenta a lo largo del día; esta oscilación de periodo diario se correlaciona con un desfase de una o dos horas con la evolución de la temperatura del aire (ver figura 3.25., mes de mayo). Durante los meses de julio y agosto se han

formado termoclinas secundarias todos los días y se observa como, al ir hundiéndose la termoclina principal, las oscilaciones térmicas diarias en la capa de mezcla (el calor absorbido en superficie se transmite rápidamente en profundidad en el epilimnion debido a la escasa resistencia mecánica a la mezcla de la columna de agua) afectan durante julio al agua a una profundidad de 5.25 m pero no a 7.25 m; en agosto el epilimnion tiene mayor espesor y a 7.25 m afectan los cambios diarios mientras progresivamente se va rompiendo la termoclina. Durante los meses de noviembre, diciembre y enero las termoclinas secundarias son débiles y algunos días especialmente fríos no se forman en absoluto y la estabilidad es nula. Durante el mes de enero se llega

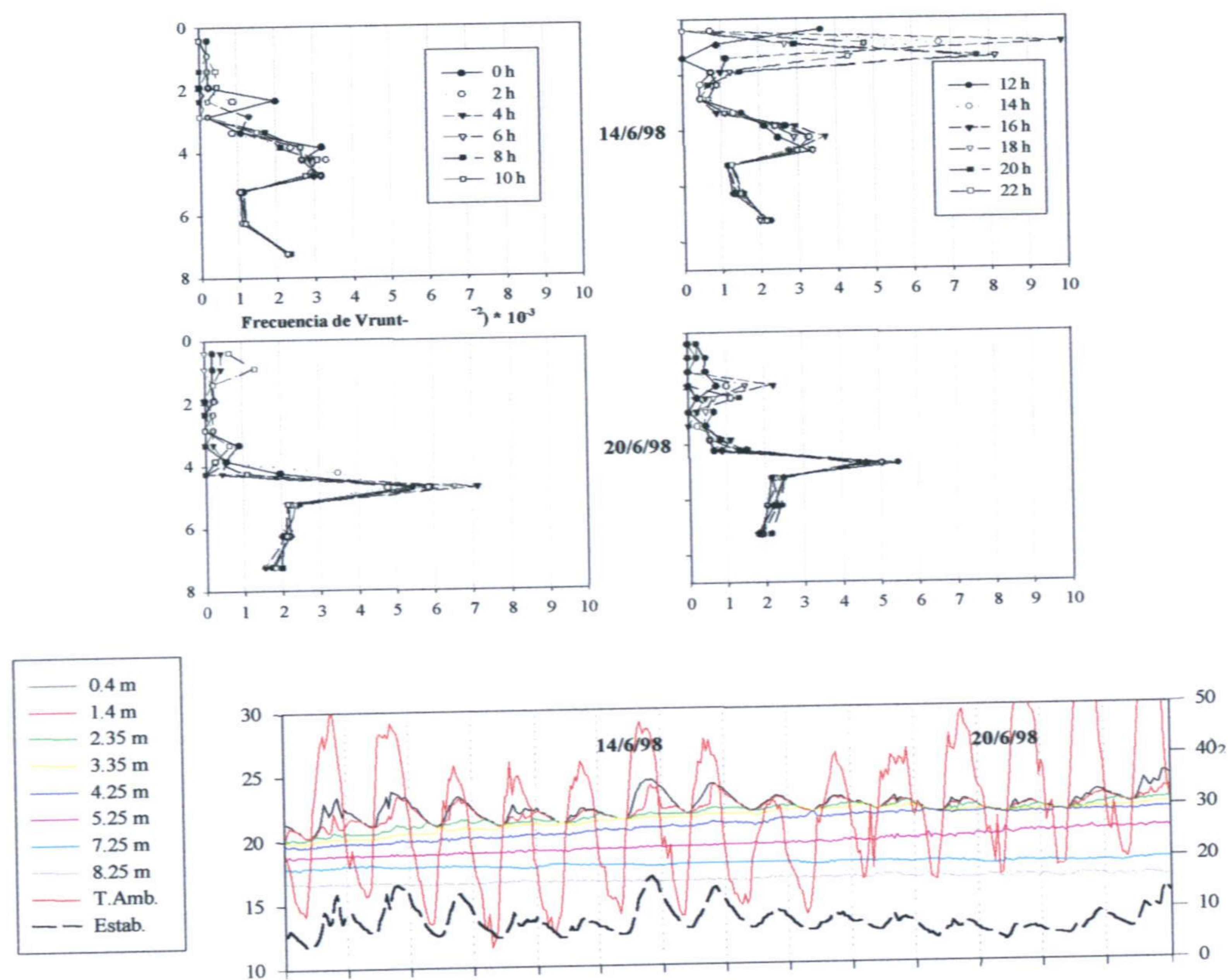


Figura 3.24. Cuadrado de la frecuencia de Brunt - Väisälä (N^2) y estabilidad (S) en la laguna Chica de Archidona desde el 9/6/98 al 22/6/98

a producir estratificación inversa (23 al 29/1/99), sin que el lago se hiele (en este caso, se clasificaría como dimíctico).

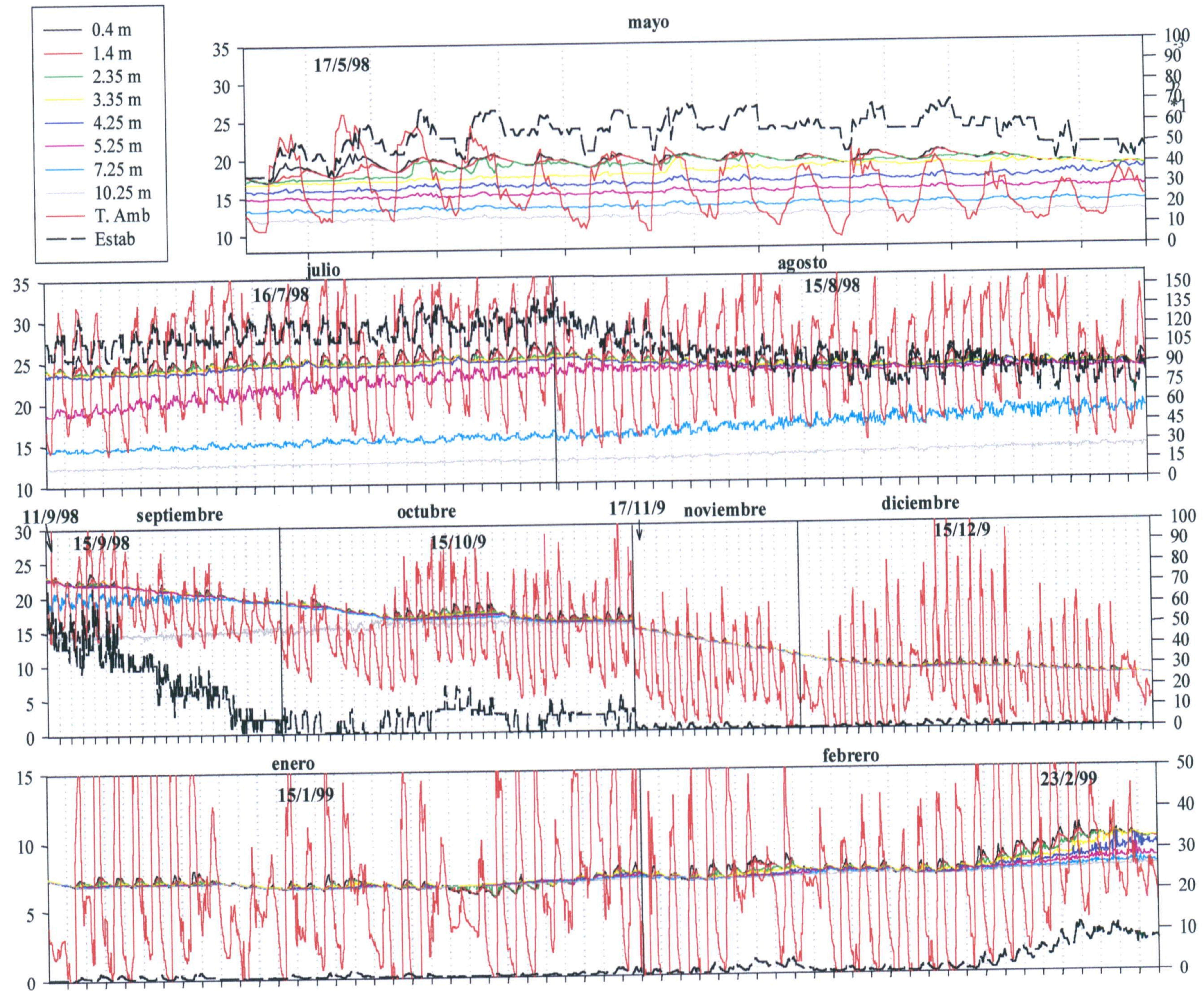


Figura 3.25. Estabilidad (S) en la laguna Grande de Archidona desde el 16/5/98 al 27/2/1999

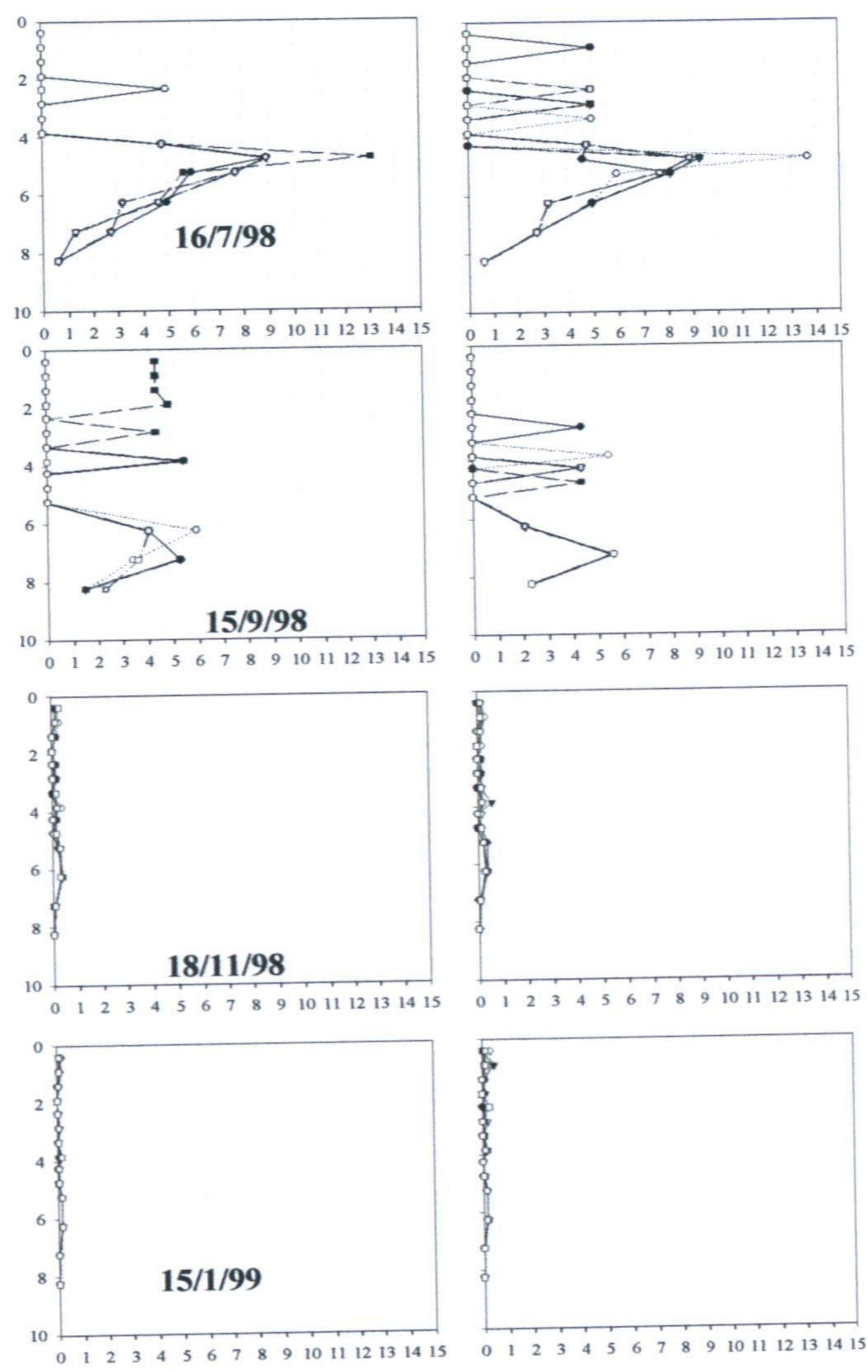
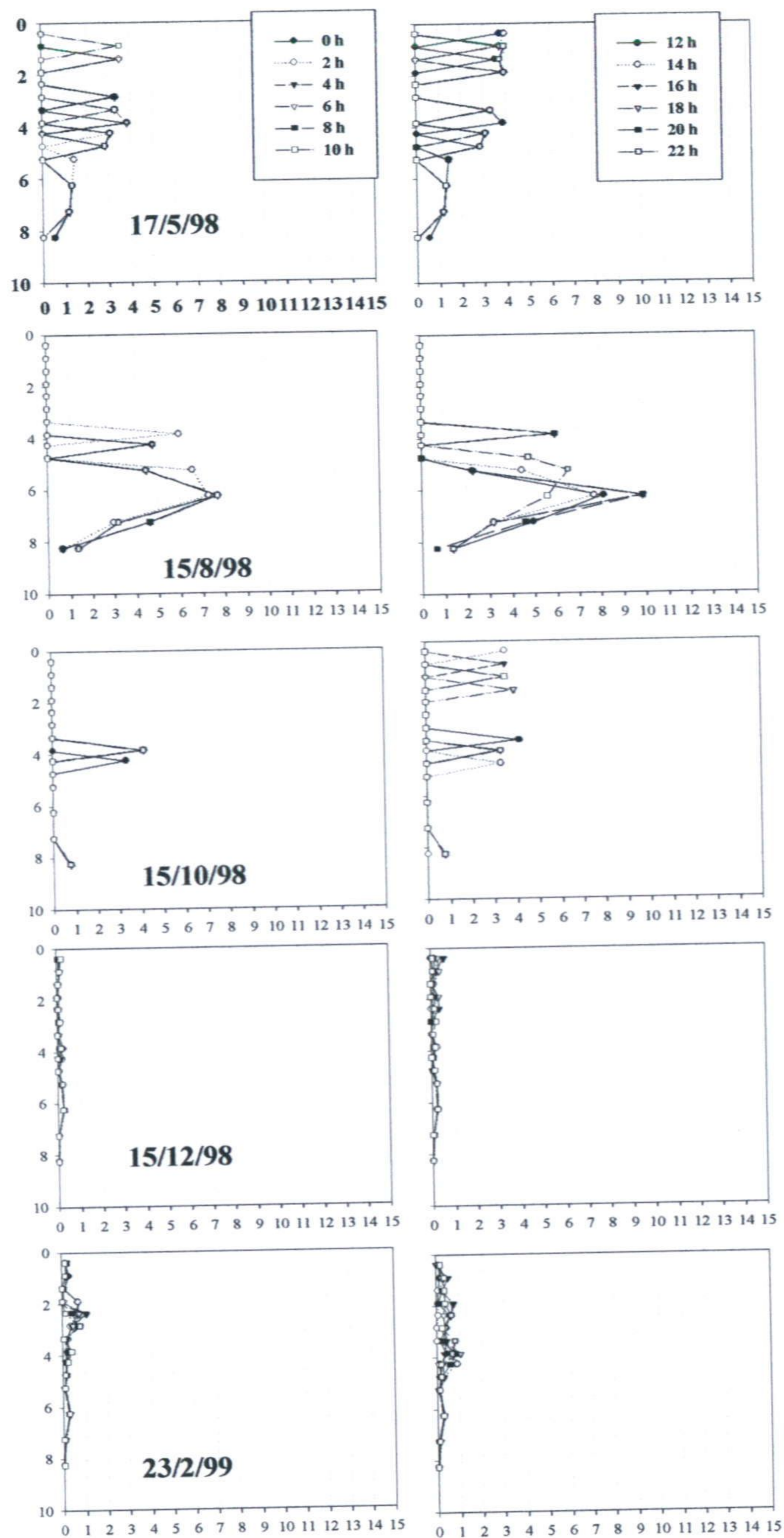


Figura 3.26. Cuadrado de la frecuencia de Brunt - Väisälä (N^2) en la laguna Grande de Archidona del 16/5/98 al 27/2/99

La N^2 en las diferentes capas a lo largo del tiempo de estudio (figura 3.26.) varía desde valores de 0 s^{-2} durante la mezcla hasta valores de 10 e incluso $14 * 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ durante la estratificación. Parece apreciarse en estas figuras que la termoclina secundaria se forma, o presenta máximos de frecuencia de Brunt - Väisälä, a distintas profundidades a lo largo de una misma jornada, por ejemplo, en la distribución durante el día 17/5/98, o la tarde del 15/10/98.

En las figuras 3.27. y 3.28. se han representado la evolución de estabilidad y frecuencia en la columna de agua de una laguna que no presenta, debido a su profundidad y características morfométricas, un periodo de estratificación térmica bien definido en ninguna época del año (la albufera Honda de Adra). La estabilidad es, por tanto, relativamente baja durante todo el periodo de estudio (30/3 al 20/5 del 2001). En este caso se han representado también (figura 3.28.) distintas variables meteorológicas (radiación solar directa, W/m^2 , precipitación, mm, temperatura del aire, $^{\circ}\text{C}$, y presión atmosférica, mb), con objeto de relacionarlas con el comportamiento térmico del lago.

En relación con la estabilidad de la columna de agua, los valores fluctúan en torno a 1.5 g-cm/cm^2 , alcanzan un valor de 3 g-cm/cm^2 en los días de máxima estabilidad y se reducen prácticamente a 0 durante la mezcla. Son valores relativamente bajos, por los motivos anteriormente comentados. En las figuras en las que se representan, respectivamente, la estabilidad y las variables meteorológicas, se observa como la estabilidad de la columna de agua tiene una evolución similar a la de la presión; entre el 7 y el 14 /5/01 se observa un descenso de la presión atmosférica que coincide con un descenso en la estabilidad, aunque con un cierto retardo. El periodo en el que la estabilidad es más baja, periodo durante el cual no se produce estratificación secundaria durante cuatro días seguidos (30/4 a 3/5/01), coincide también con un descenso de presión atmosférica, y con precipitaciones que, aunque escasas (ningún día superan los 2 l/m^2), influyen en la homotermia del sistema. Los días cubiertos también impiden que se forme la microtermoclina superficial; al final del periodo de estudio (19/5/01) la radiación solar es baja (máximo bihorario de 200 W/m^2), lo que impide que se forme dicha termoclina. La velocidad del viento es un factor determinante en la ruptura de la estabilidad de la columna de agua en sistemas acuáticos; en la figura 3.29. se puede apreciar esta relación.

La frecuencia de Brunt - Väisälä en la albufera Honda se ha representado en las figuras 3.27. y 3.28. En 8 de los 52 días del periodo de estudio en esta albufera el valor de dicha variable alcanza máximos horarios de $25 * 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ (7/5/01) en días especialmente calurosos. Se aprecia una termoclina principal que se mantiene aproximadamente a 1 m de profundidad durante todo el periodo, aunque puede llegar a romperse o debilitarse en días concretos (14/5/01).

3.3.4. Balances térmicos

Se han realizado balances térmicos bihorarios en las lagunas Grande de Archidona y Honda de Adra. Estos balances son muy sensibles a la escala utilizada, es decir, al intervalo temporal considerado para realizar los cálculos. Tradicionalmente estos balances se han realizado para periodos mensuales (Hoyos Alonso, 1996, lago de Sanabria) o diarios (Armengol, 2000, embalse del Sau); sin embargo, los sistemas acuáticos ganan y pierden energía cada día, ya que la radiación solar de onda corta absorbida es un factor determinante en estos balances, de tal manera que los sistemas

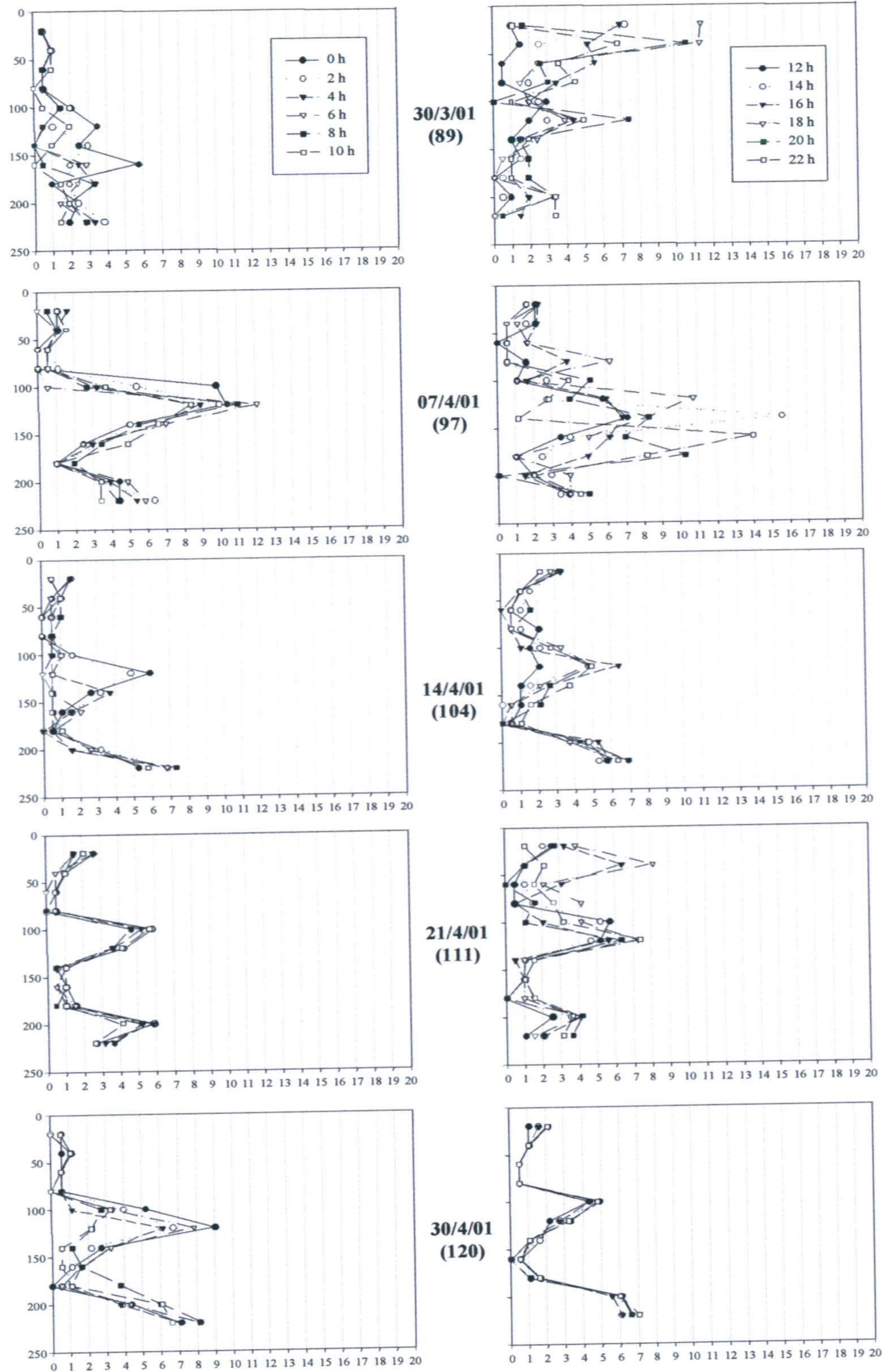


Figura 3.27. Cuadrado de la frecuencia de Brunt – Väisälä (N^2) en la laguna Honda de Adra desde el 30/3/01 al 20/5/01

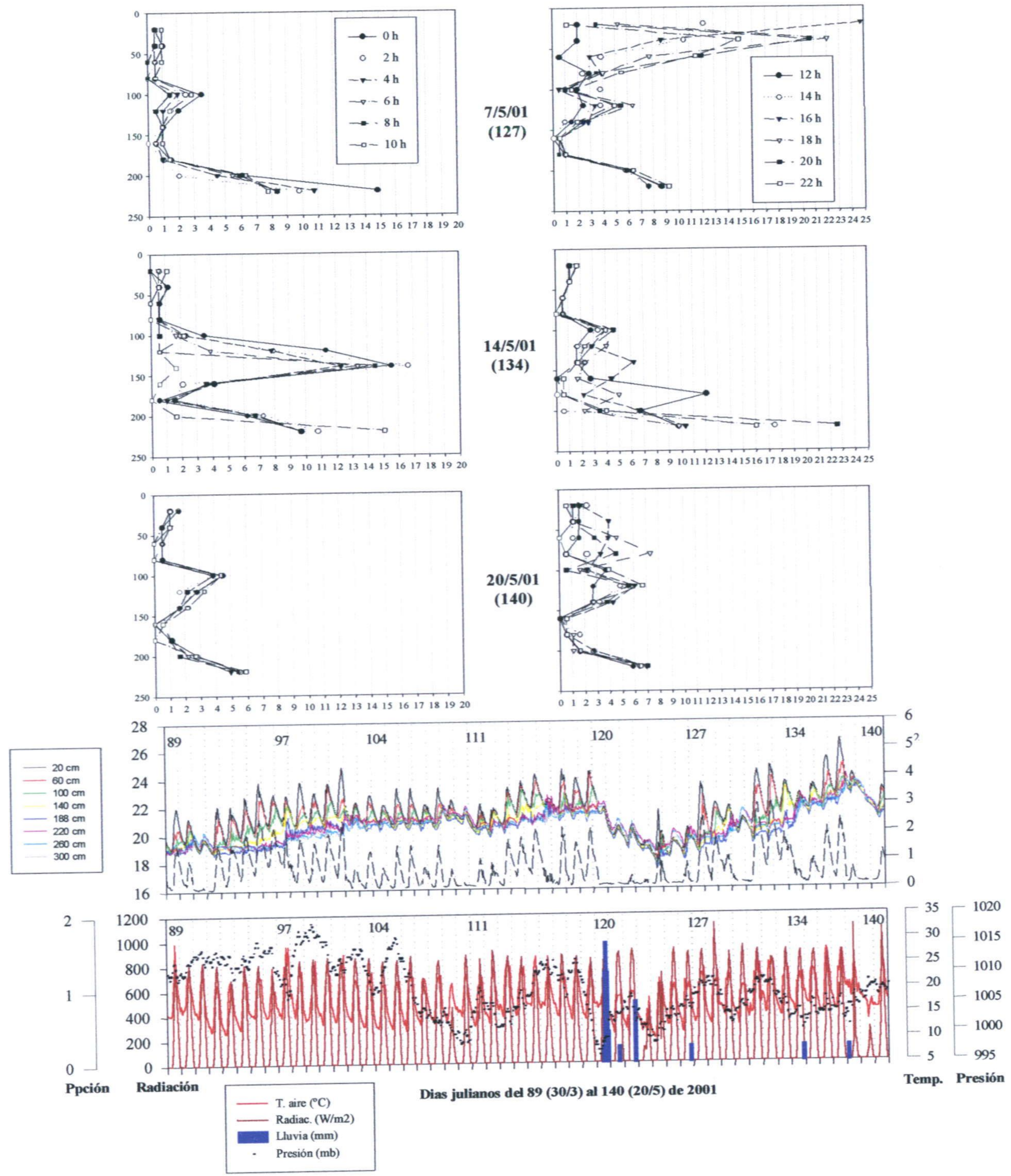


Figura 3.28. Cuadrado de la frecuencia de Brunt - Väisälä (N^2) y estabilidad (S) en la laguna Honda de Adra desde el 30/3/01 al 20/5/01

acuáticos en general ganan calor durante el día y lo pierden durante la noche; este comportamiento no puede estudiarse convenientemente a no ser que la frecuencia de medidas de todas las variables que intervienen en el balance sea, al menos, bihoraria o trihoraria.

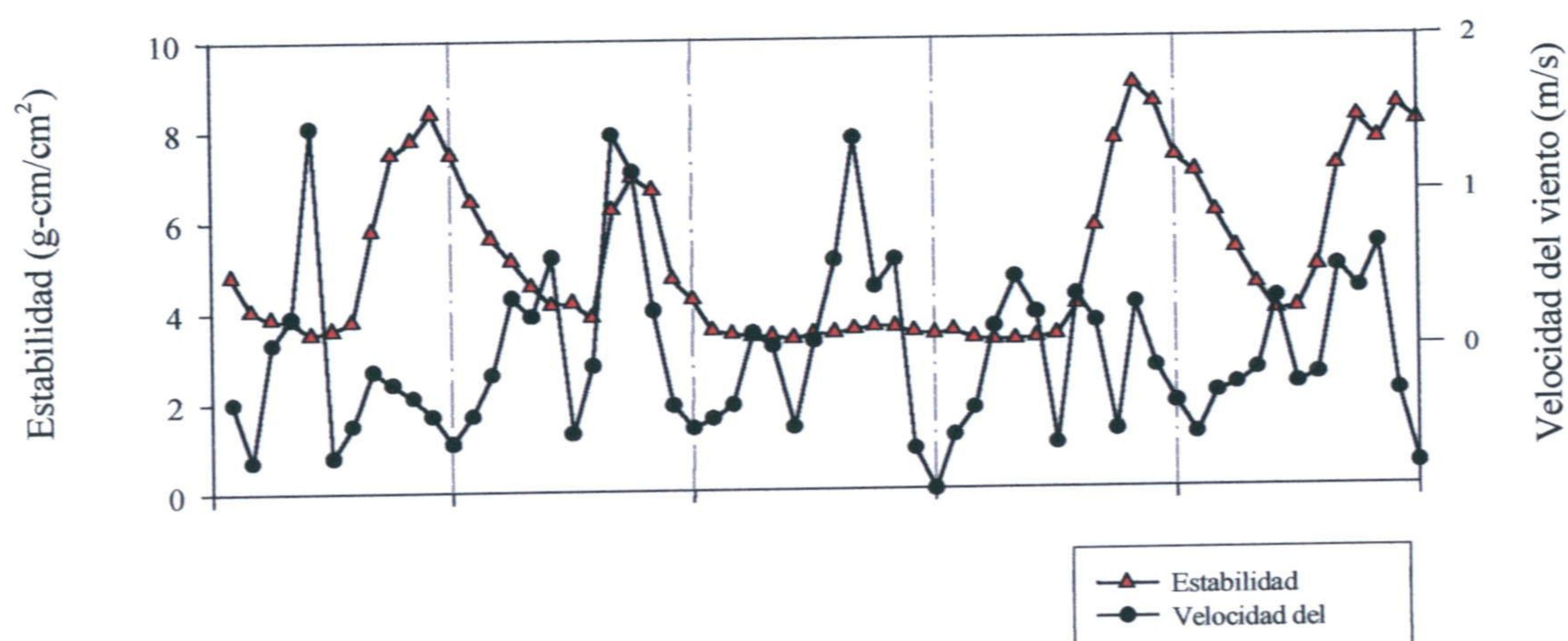


Figura 3.29. Evolución de la velocidad del viento y la estabilidad de la columna de agua en la albufera Honda de Adra (30/3/01 a 3/4/01)

En la laguna Grande de Archidona, el balance bihorario se ha realizado para un periodo de 10 meses (mayo 1998 a febrero 1999). El lago va ganando calor desde mayo hasta octubre, mes en el que las pérdidas nocturnas superan las ganancias diurnas. El mes con el contenido de calor más bajo (tabla 3.5.) fue diciembre de 1998 (-423 W/m^2), y con el contenido más alto fue septiembre de 1998 (742 W/m^2). La escasa pérdida de calor que tuvo lugar durante el periodo comprendido entre septiembre de 1998 y febrero de 1999 es la causa de que el balance térmico, que se suele expresar como la diferencia entre el máximo y el mínimo calor contenido en la columna de agua (Hoyos Alonso, 1997), resulte positivo (319 W/m^2). Como se puede apreciar en la figura 3.30., los términos de la ecuación del balance que más energía aportan al sistema son la radiación de onda larga y corta absorbida, H_{la} y H_{sa} respectivamente, sobre todo la primera (media de 268 W/m^2 frente a 163 W/m^2). El término de pérdida energética más importante es la radiación de onda larga emitida (H_{le}), que es máximo en verano pero va disminuyendo a partir de septiembre de 1998. El flujo de calor latente (H_e) es a su vez resultado de un balance y mide el intercambio de calor que se produce como consecuencia de dos procesos, evaporación y condensación. Si el signo es negativo, lo que conlleva pérdida de energía del sistema, predomina la evaporación. En la laguna Grande predomina la evaporación en los meses de estiaje (mínimos valores en julio y en agosto, de -72 W/m^2) y la condensación durante el invierno, con máximos en diciembre y enero (20 W/m^2); este término es el que presenta una menor desviación típica (tabla 3.5.). El flujo de calor sensible (H_c) es la fracción del balance que representa la energía que se intercambia entre la atmósfera y el agua por conducción molecular y turbulenta, función del viento a través de f_e (ver metodología) y puede tener signo negativo o positivo; en el caso que nos ocupa su valor medio es de -29 W/m^2 . La energía neta intercambiada

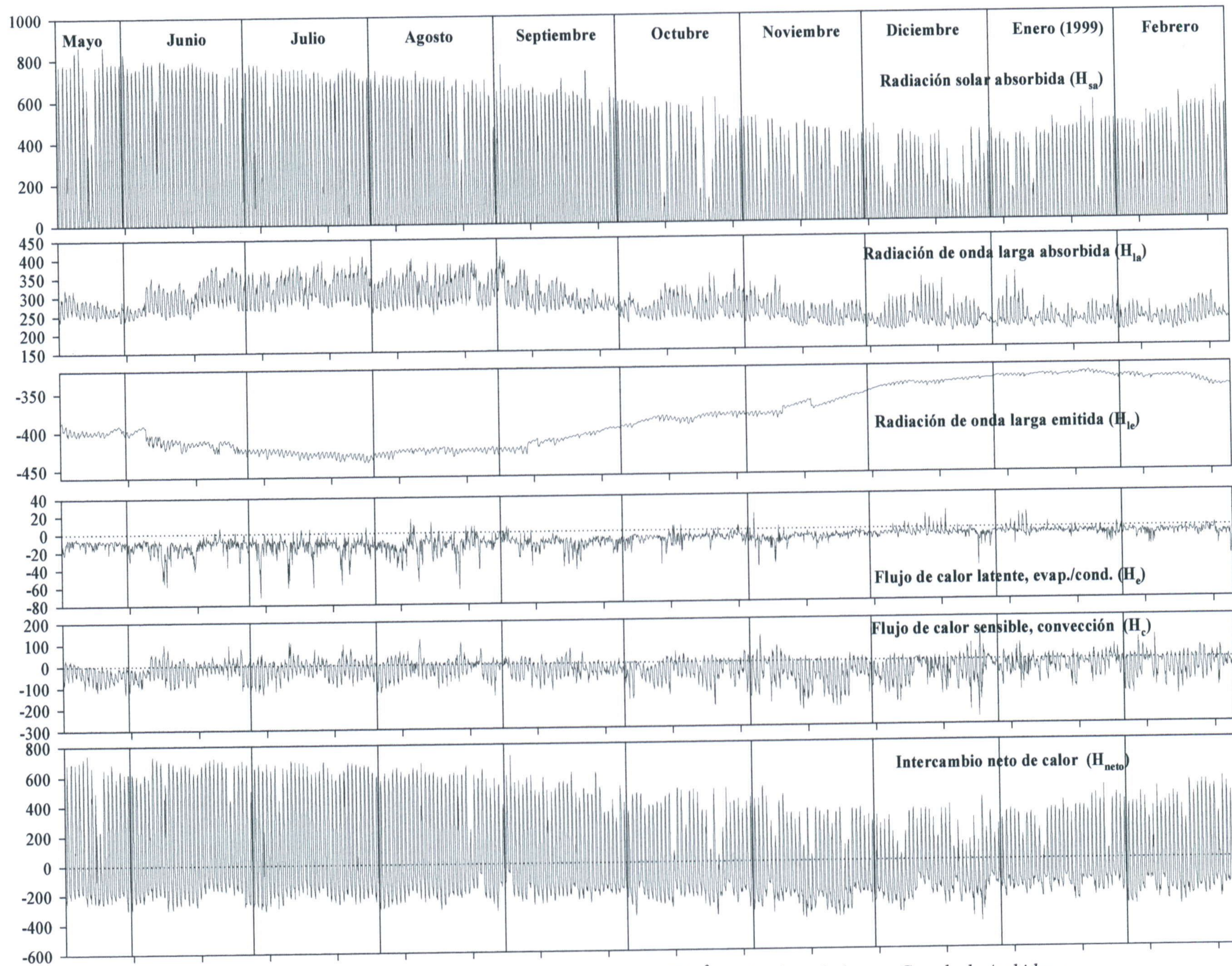


Figura 3.30. Resultados del balance térmico bihorario (W/m^2) realizado en la laguna Grande de Archidona

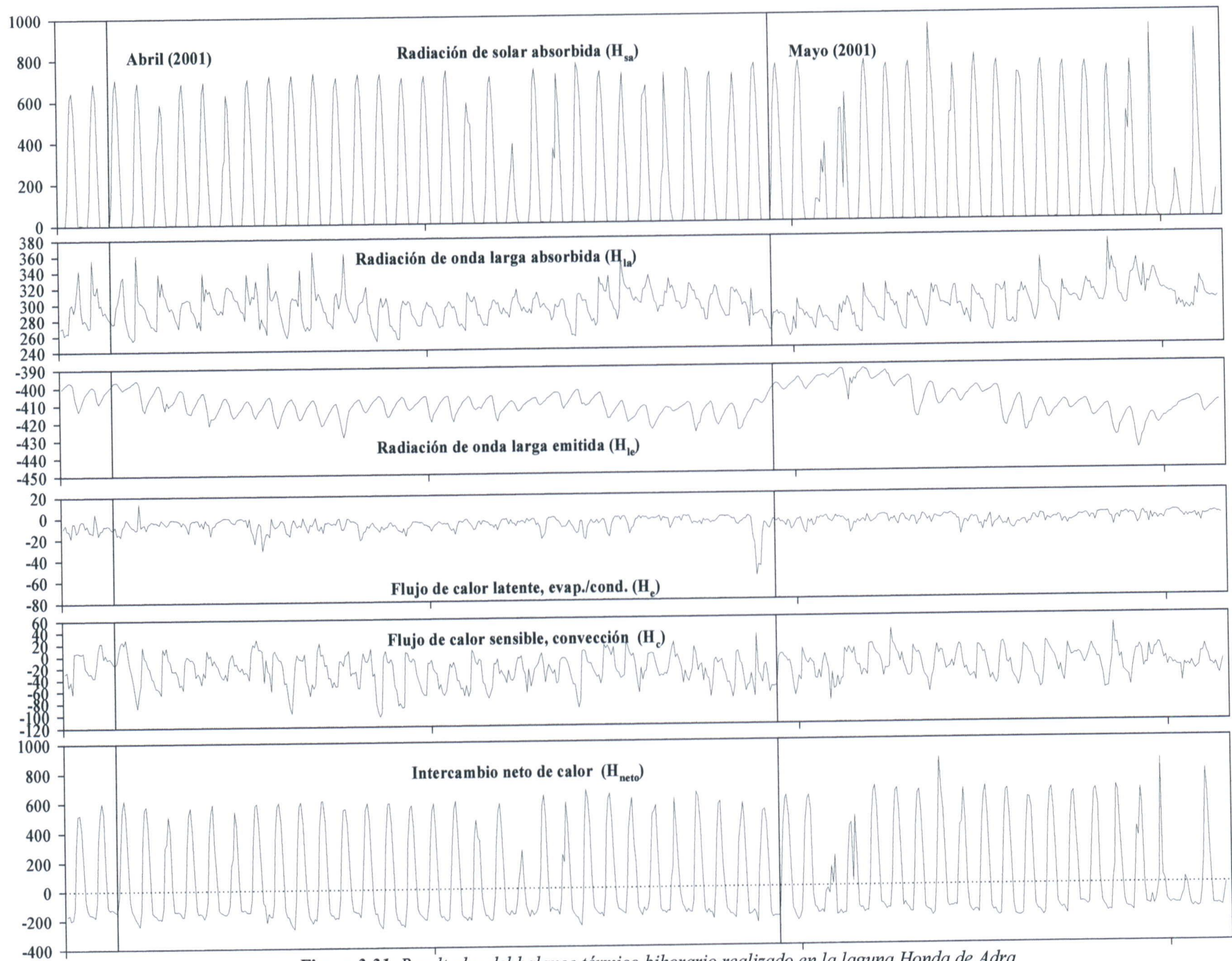


Figura 3.31. Resultados del balance térmico bihorario realizado en la laguna Honda de Adra

(H_{neta}) es positiva, aunque su valor medio es bajo (6 W/m^2). Hubiese sido deseable haber ampliado el periodo de estudio hasta haber completado un año o más. Aún así, los resultados obtenidos con esta metodología apuntan a considerar como valores indicativos del balance térmico los valores medios, dada la cantidad de datos que están implicados en los distintos términos del balance, en este caso más de 20000 mediciones de cada variable.

El balance térmico realizado en la laguna Honda de Adra (figura 3.31.) se refiere a un periodo de tiempo más corto (los meses de abril y mayo de 2001) motivo por el que los resultados han de interpretarse teniendo en cuenta que corresponden a la primavera, que es un periodo de calentamiento o ganancia de calor del sistema en cuestión. En este caso la radiación solar absorbida (H_{sa}) tiene una importancia relativa mayor que en el caso anterior; en la figura 3.31. se observa como los días en los que el valor de esta variable es menor, por ejemplo días muy nublados, el intercambio neto positivo es también menor, e incluso hay días en los que no hay prácticamente ganancias de calor. En la tabla 3.6. se observa que los valores máximos de radiación solar absorbida son mayores que en la laguna Grande (944 W/m^2 frente a 863 W/m^2). Los demás componentes de la ecuación del balance tienen un desarrollo de periodo diario, con la excepción del flujo de calor latente (H_e); en este caso predomina la pérdida de energía por evaporación frente a la condensación.

Balance bihorario Grande (16/5/98-27/2/99)	H _{sa}	H _{la}	H _{le}	H _e	H _c	H _{neto}
Media	163	268	-386	-10	-29	6
Desviación típica	193	37	31	5	38	229
Total	562972	926724	-1333653	-35329	-98809	21905
Mínimo	0	188	-441	-72	-268	-423
Máximo	863	405	-329	20	136	742

Tabla 3.5. Estadísticos básicos del balance bihorario en la laguna Grande

Balance bihorario Honda (29/3/01-21/5/01)	H _{sa}	H _{la}	H _{le}	H _e	H _c	H _{neto}
Media	219	294	-411	-8	-25	70
Desviación típica	240	16	6	4	21	264
Total	138707	186267	-259870	-4876	-16101	44128
Mínimo	0	251	-439	-58	-104	-268
Máximo	944	372	-392	13	44	864

Tabla 3.6. Estadísticos básicos del balance bihorario en la laguna Honda

3.4. Características de los sedimentos del fondo lagunar

3.4.1. Metodología

La composición química de las muestras de suelos tomadas en las diferentes lagunas estudiadas se ha analizado en los Servicios Técnicos de la Universidad de Granada. Los elementos mayores de la fracción arcilla se han estudiado mediante fluorescencia de rayos X, utilizando para ello un equipo Phillips PW 1404.

La textura se ha definido mediante el método de la Pipeta de Robinson (1922), técnica que consiste en tomar alícuotas de la suspensión del suelo dispersa, a diferentes tiempos y profundidades, de acuerdo con la Ley de Stokes. Esta técnica permite la recogida y cuantificación de todas las fracciones: arcillas y limos, por pesada de las alícuotas, y arenas por tamización posterior. Se ha seguido el método de Tyurin (1951) para la cuantificación de la materia orgánica; con este método se analiza el carbono orgánico de la muestra mediante oxidación por vía húmeda. El oxidante utilizado es dicromato potásico y posteriormente se valora la cantidad de dicromato reducido mediante sal de Mohr. El factor de conversión de % de carbono orgánico a % de materia orgánica es el de Van Bemmelen, deducido estadísticamente, y que supone que la materia orgánica contiene un 58 % de carbono orgánico.

La composición mineralógica se ha determinado mediante difracción de rayos X, utilizando un difractómetro Phillips, modelo PW 1710, con rendija automática, con radiación $\text{CuK}\alpha$ y una velocidad de exploración de 2° a 6° por minuto, desde $2^\circ 2\theta$ a $60^\circ 2\theta$. Dicho estudio se ha realizado tanto en la muestra total como en la fracción arcilla. Para la cuantificación de las distintas fases minerales se han utilizado los valores de poderes reflectantes de Biscaye (1964).

El análisis de metales pesados (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} y Pb^{2+}), en suelos recogidos durante las campañas de 1998, se ha realizado en el Laboratorio de Vigilancia y Control de la Contaminación del INIMA.

El conocimiento de la textura, composición química y mineralogía de los depósitos de las lagunas supone un aspecto de interés para poder interpretar las peculiaridades hidroquímicas del agua de estos sistemas. Por otra parte, permite también establecer tipologías según criterios de evolución mineralógica y geoquímica, e identificar los procesos de transformación mineral que se están produciendo actualmente en los sedimentos de estas lagunas, sometidas a un clima mediterráneo con tendencia semiárida.

Los sondeos piezométricos realizados en las lagunas del entorno de Fuente de Piedra indican que el sustrato de las formaciones superficiales corresponden mayoritariamente a materiales detríticos finos o muy finos. Las pruebas de inyección realizadas indican que los valores de conductividad hidráulica son del orden de 0.01 m/d.

El cuaternario, de techo a muro, está representado por una costra salina blanca de hasta 3 cm de espesor, bajo la cual existe una capa limosa, de espesor milimétrico, con

tintes rojizos. Bajo estas dos capas se encuentra una capa de unos milímetros de espesor, de lodos orgánicos, de carácter reductor y, por último, un depósito limoso o, de acuerdo con Castellón (1970), margoso, de hasta 3 m de espesor. Bajo los sedimentos cuaternarios aparece un depósito de hasta 16 m de espesor de arcillas margosas blancas con cristales de yeso, que podrían corresponder a depósitos de terraza lagunar, y, por último, calcarenitas tortonienses y arcillas y limos de colores abigarrados del triásico.

3.4.2. Características texturales, conductividad eléctrica y contenido en materia orgánica

Los depósitos superficiales predominantes en la zona litoral de las lagunas son de naturaleza clástica o clástico-evaporítica. Los materiales detríticos son mayoritariamente de grano fino, con predominio de las arcillas. En la figura 3.32. se han representado las características texturales de los sedimentos recogidos en lagunas estudiadas; todas las muestras tienen textura arcillosa. Los materiales arcillosos, al secarse en superficie, pierden cohesión y son arrastrados por el viento, hasta depositarse generalmente en sectores perimetrales, junto a la orla de vegetación helófitas, sin que se aprecien pautas de concentración preferencial. En estos materiales se observan estructuras de agrietamiento, que permiten en ocasiones apreciar el nivel subyacente de los lodos orgánicos sapropélicos.

En las lagunas temporales del entorno de Fuente de Piedra, salvo en la laguna Dulce, se han identificado dos tipos de materiales evaporíticos (Almécija, 1997). El primer tipo estaría relacionado con el volumen decreciente de agua, y formación de placas flotantes o "rafts" de cristales de halita de varios mm de arista, con hábito de crecimiento en forma de tolva. El segundo tipo se produciría a partir de eflorescencias freáticas, con cristales de halita apenas perceptibles. Es frecuente que la costra salina se encuentre agrietada, por deshidratación, respecto a los sedimentos húmedos subyacentes, lo que genera formas poligonales con los bordes ligeramente elevados por efecto de la

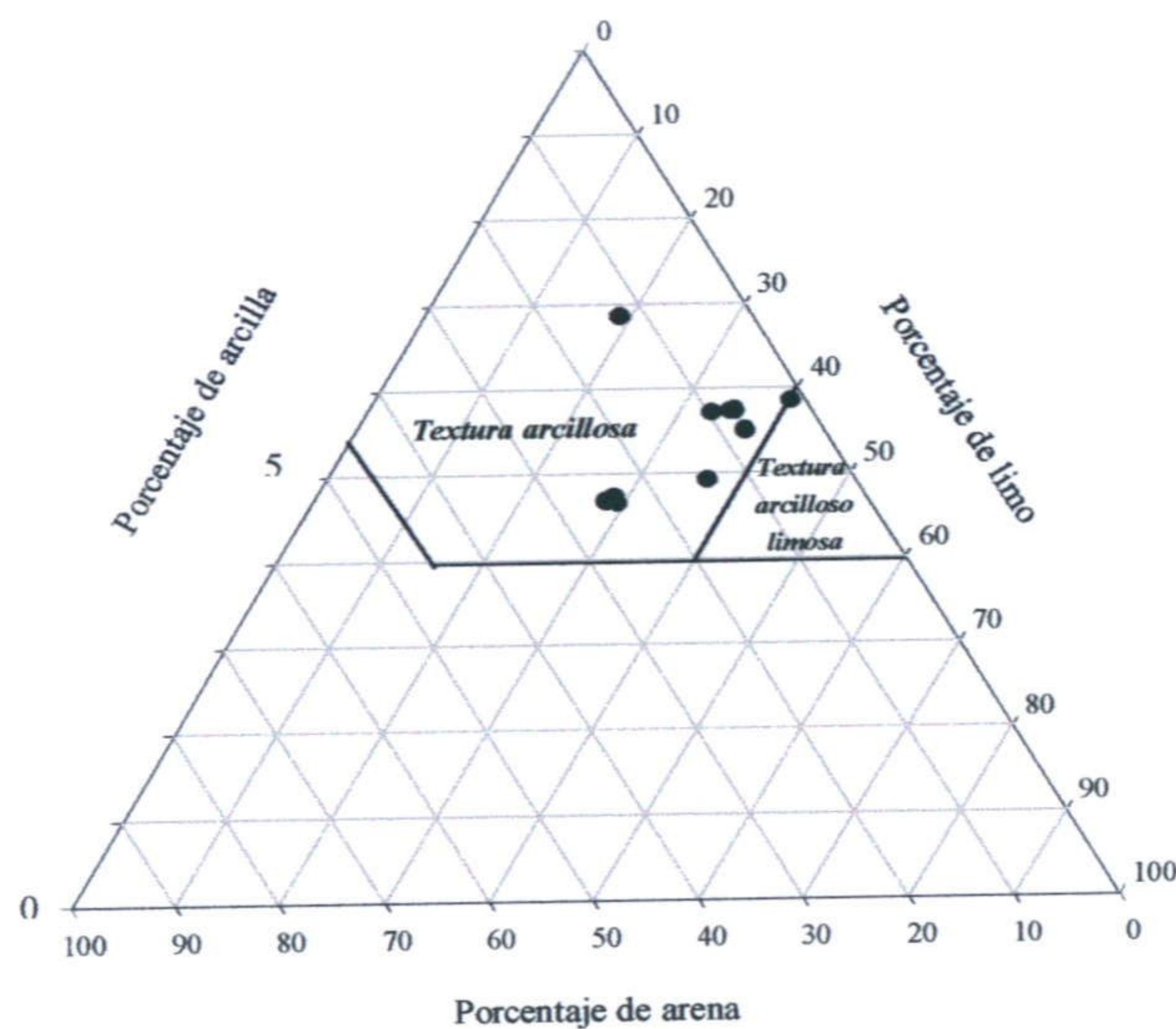


Figura 3.32. Características texturales de los sedimentos de las lagunas estudiadas

precipitación efluente.

En ciertas lagunas (Fuente de Piedra, Salada, Ratosa y Dulce) se reconocen numerosas depresiones someras y subcirculares de tamaño métrico con los bordes ligeramente elevados, debidas a la actividad de los flamencos que habitan estas lagunas cuando su lámina de agua es escasa (20 - 30 cm) y las lagunas están cerca de la desecación total

La materia orgánica (figura 3.33.) es abundante en estas muestras. Corresponde, como en el caso de los sedimentos tomados en la laguna de Fuente de Piedra y las costeras, desembocadura del Guadalhorce y albuferas de Adra, a los lodos orgánicos anteriormente descritos. Las características organolépticas de estos materiales, con fuerte olor a sulfhídrico y color negro, son indicadoras de condiciones reductoras y abundancia de materia orgánica. Las lagunas situadas en afloramientos de materiales triásicos, como es el caso de las lagunas de Antequera y de Archidona, son las que presentan un menor porcentaje de materia orgánica. Se ha representado la conductividad eléctrica de estos sedimentos en mS/cm. El rango está comprendido entre más de 100 mS/cm (Fuente de

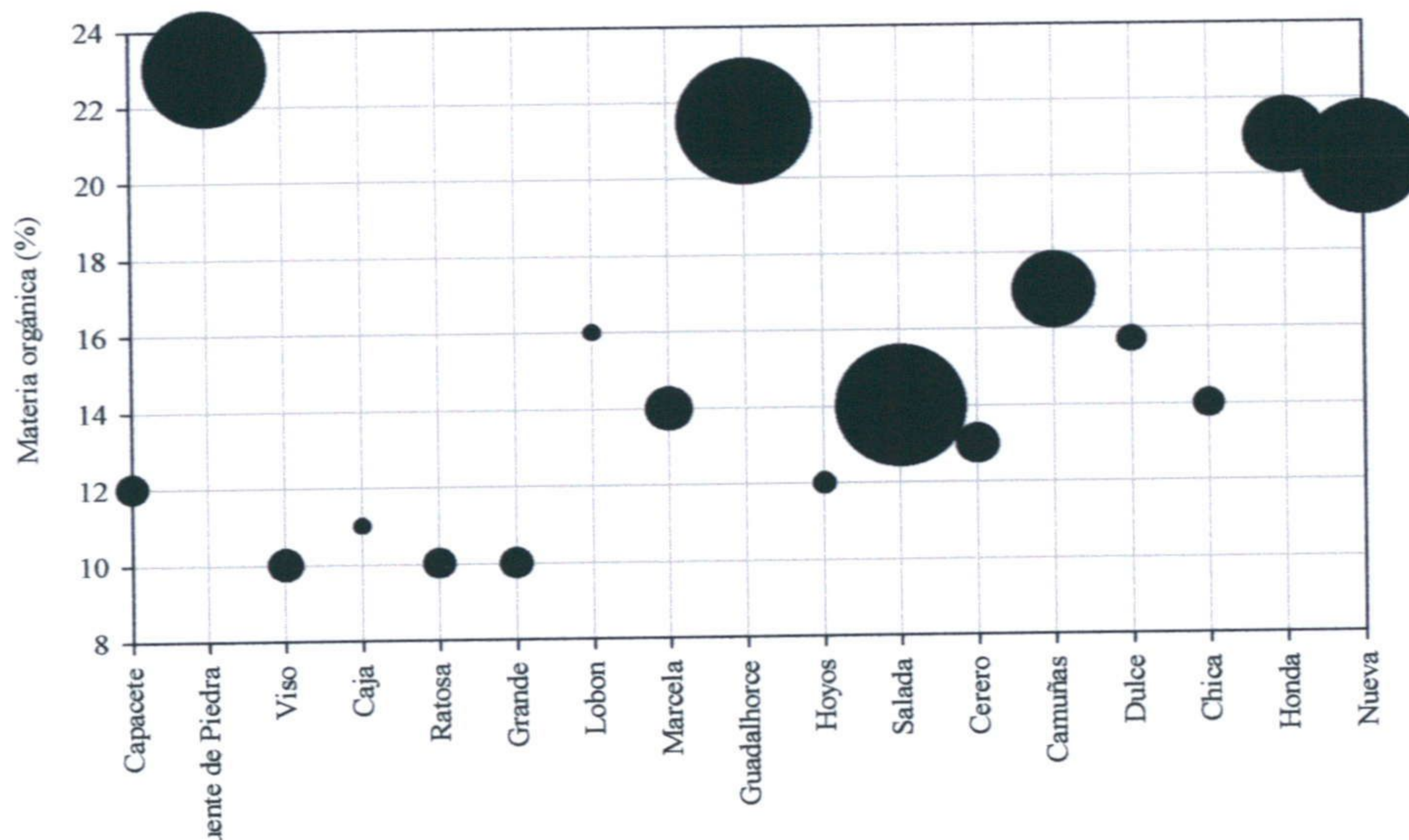


Figura 3.33. Contenido en materia orgánica de los sedimentos de las lagunas estudiadas. El tamaño de cada punto es proporcional a la conductividad eléctrica de la muestra

Piedra, Salada) y menos de 1 mS/cm (Caja, Lobón). Parece establecerse una cierta correlación positiva entre contenido en materia orgánica y salinidad del sedimento, pero esta relación no se cumple en todos los casos. Si se asume que las lagunas continentales más antiguas deberían ser más salinas, a igualdad de otros factores, sería lógico pensar que son ecosistemas relativamente más maduros y, consecuentemente, que en sus sedimentos habrá una mayor cantidad de materia orgánica.

3.4.3. Descripción mineralógica y geoquímica

Los sedimentos recientes depositados en las lagunas estudiadas tienen un origen y una composición similar. Se han establecido cuatro grupos en los que se incluyen la totalidad de las muestras analizadas. Se ha podido observar una cierta relación entre la composición química y mineralógica del sedimento y las características hidroquímicas del agua. También se han detectado indicios de neoformación mineralógica y de intercambio de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), en presencia de agua con pH mayor que 8. En general, en los depósitos clásticos, se han identificado los minerales cuarzo, filosilicatos, calcita, dolomita, feldespatos y trazas de hematites. La fracción arcillosa se compone de illita, clorita, esmectitas, caolinita, paligorskita e interestratificados. Los análisis químicos (tabla 3.7.) han puesto de manifiesto que el óxido más abundante es la

Laguna	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O	% TiO ₂	% P ₂ O ₅	% P.C.	Error medida %
HONDA	25.20	17.22	6.33	0.05	5.34	20.78	0.73	1.79	0.37	0.71	21.85	1.00
NUEVA	19.54	16.33	5.66	0.05	6.50	29.40	0.44	0.62	0.20	0.45	20.49	1.00
HOYOS	41.87	21.88	7.61	0.07	6.92	2.52	0.06	5.11	0.50	0.41	12.12	0.99
CAPACETE	41.83	19.68	10.27	0.13	10.28	1.63	0.78	2.03	0.76	0.34	12.06	1.00
VISO	44.12	24.46	8.33	0.10	5.77	0.88	0.12	4.86	0.65	0.21	9.70	0.99
GRANDE	45.90	22.40	7.91	0.05	5.31	1.34	0.12	6.10	0.54	0.27	9.74	1.00
CAJA	44.49	25.84	10.13	0.16	3.37	0.72	0.08	4.32	0.56	0.21	10.57	1.00
CAMUÑAS	33.74	17.40	7.40	0.10	11.44	9.26	0.05	1.95	0.55	0.29	17.29	0.99
MARCELA	39.65	19.46	9.58	0.12	9.70	3.75	0.00	2.47	0.67	0.35	13.49	0.99
LOBON	44.21	17.70	7.22	0.11	1.85	8.57	0.07	3.11	0.70	0.32	16.05	1.00
GUADALHORCE	40.63	16.17	5.63	0.12	2.86	9.02	0.91	2.57	0.56	0.75	21.45	1.01
CHICA	44.95	20.62	7.14	0.05	4.73	2.11	0.08	6.29	0.50	0.43	13.92	1.01
SALADA	50.41	13.73	7.16	0.11	3.02	6.94	0.62	3.22	0.66	0.20	13.04	0.99
CERERO	29.01	12.55	4.92	0.08	2.73	21.99	0.04	1.83	0.40	0.33	26.98	1.01
RATOSA	54.56	20.06	8.19	0.09	2.09	0.85	0.16	3.43	0.77	0.23	10.16	1.01
FUENTE DE PIEDRA	35.65	11.48	4.80	0.06	4.80	15.89	0.37	2.47	0.38	0.17	22.96	0.99
DULCE	45.82	17.74	7.07	0.14	2.08	8.40	0.15	1.96	0.79	0.25	15.78	1.00

Tabla 3.7. Composición química (%) de los sedimentos lacustres estudiados

silíce, que en la mayoría de las lagunas supera el 33%, salvo en Cerero, Honda y Nueva por su alto contenido en materia orgánica, que es el segundo compuesto más abundante. Los óxidos de aluminio, calcio y magnesio son los que siguen en proporción. El óxido menos abundante de los analizados es el de manganeso, con un contenido medio en todas las muestras de aproximadamente 0.07%.

En relación con la composición mineralógica de la costra evaporítica, los análisis que se realizaron en muestras tomadas durante periodos de desecación de las lagunas Salada, Fuente de Piedra y Dulce, han identificado yeso y halita en proporción semejante en la zona externa. En el interior se han identificado, en orden de abundancia, halita, yeso, glauberita, tetra y hexahedrita. En la laguna Dulce prácticamente no se ha identificado halita y la costra que se pudo muestrear estaba compuesta fundamentalmente por yeso.

Las tipologías que se han establecido han sido las siguientes:

Zona de Campillos. En este sector afloran materiales triásicos, del Tortonense y cuaternarios. Se muestrearon todas las lagunas de Campillos, salvo la laguna Redonda, por estar situada sobre un antiguo vertedero de residuos sólidos y muy próxima a la laguna Salada. La mineralogía total y de arcillas de las lagunas aparecen en la figura 3.34. y su composición química en la figura 3.35. Las muestras de las lagunas Capacete,

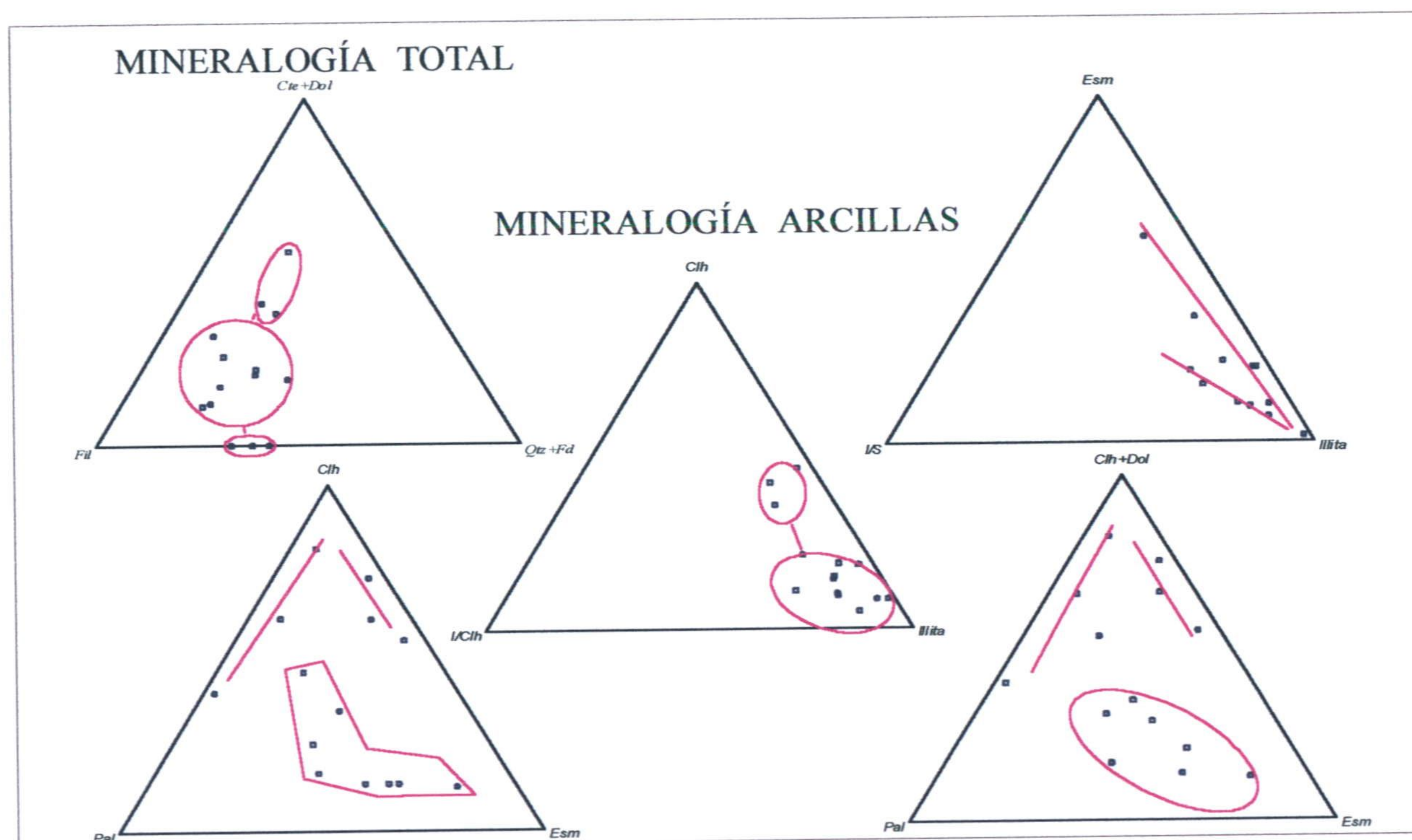


Figura 3.34. Mineralogía total y de arcillas de las lagunas estudiadas

Camuñas y Marcela muestran una asociación mineral típica de materiales triásicos béticos (Puy, 1979), con illita (40%), clorita (30%) y hematites en trazas. La muestra de Capacete incluye interestratificados I/S, junto con altos contenidos de Mg^{2+} y Ca^{2+} y bajos de Si^{4+} , Al^{3+} y Na^{+} . La mineralogía total indica una alta proporción (más del 50%) de filosilicatos.

En las muestras de las lagunas Dulce, Salada, Lobón y Cerero los filosilicatos son menos abundantes (30%) y, entre éstos, la clorita aparece en menor proporción (5%) que en Capacete, Camuñas y Marcela. Son muestras tomadas en materiales cuaternarios que parecen indicar una asociación mineralógica derivada de la alteración de materiales triásicos y, en menor medida, de materiales margosos jurásicos. Se han encontrado mayores proporciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} en la muestra de Cerero, debido a su abundancia en esmectita cálcica. La laguna Dulce es la que presenta mayores contenidos en esmectitas (40%) y caolinita (10%) de todas las muestras analizadas.

Zona de Fuente de Piedra y Antequera. En este sector afloran principalmente materiales triásicos, jurásicos margosos del Subbético Medio, tortonienses y cuaternarios. Las muestras tomadas en afloramientos de materiales cuaternarios, Fuente de Piedra y Ratosa, presentan una composición mineralógica total en la que los filosilicatos (38 y 59% respectivamente) la calcita y el cuarzo son los minerales más abundantes. Los bajos contenidos en clorita (5%) indican una gran alteración del sustrato triásico del que provienen, con altos porcentajes de esmectitas y paligorskita.

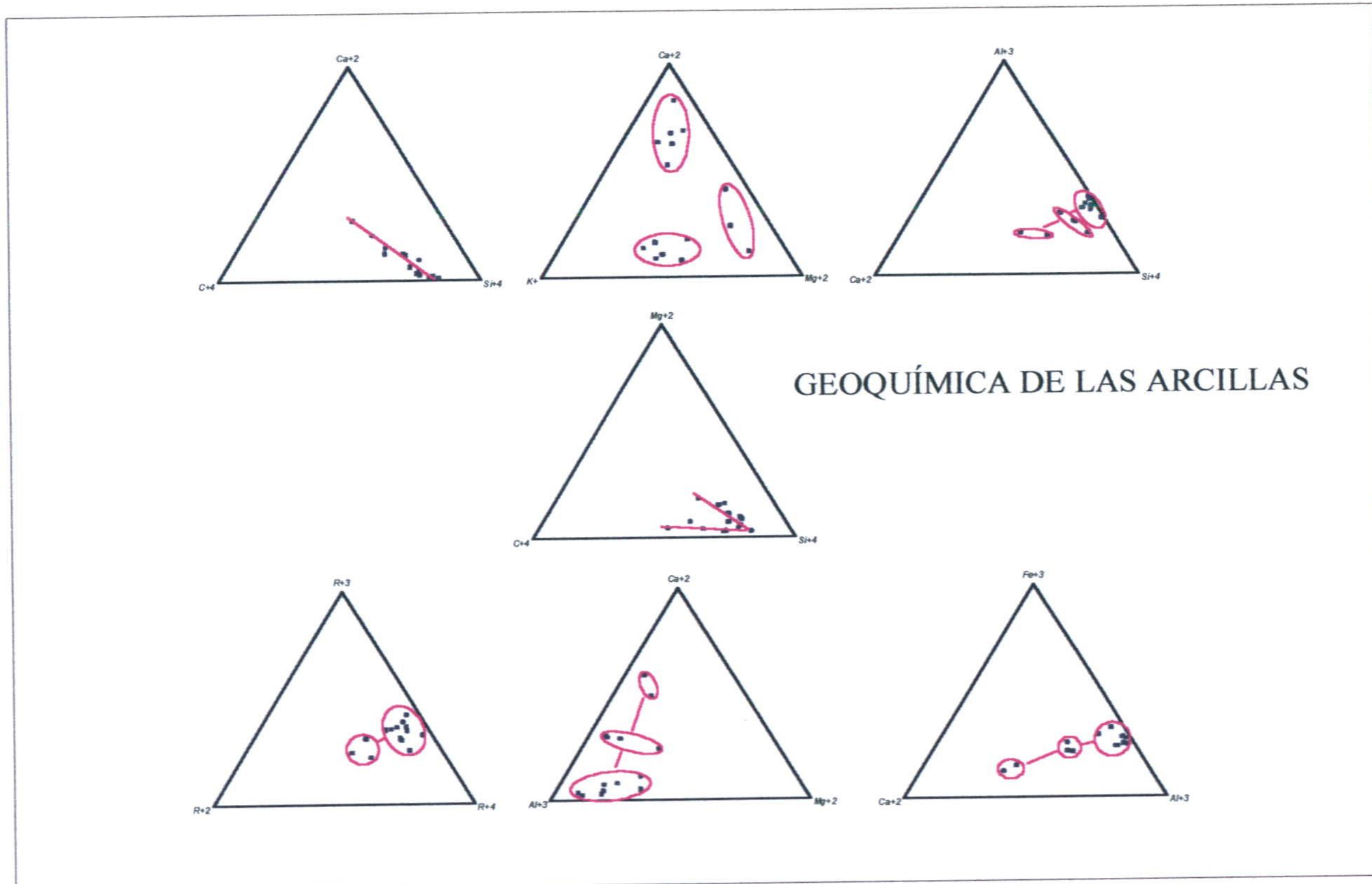


Figura 3.35. Composición química de los sedimentos de las lagunas estudiadas

En los sedimentos de las lagunas de Caja y Viso los minerales más abundantes son los filosilicatos (más del 60%) que, a su vez, están compuestos de illita (55%) y clorita (14%). En este caso la alteración de los materiales triásicos no ha sido importante. No se ha detectado calcita en ninguna de las dos lagunas y la escasez de Ca^{2+} constituye un factor limitante para la formación de esmectitas (5%) lo que, unido al exceso de Si^{4+} y Mg^{2+} , podría propiciar la neoformación de paligorskita en un medio con pH superior a 8.

Zona de Archidona. Se muestrearon la laguna Grande, la laguna Chica y el sumidero de la dolina "hoyos". Estas lagunas están situadas en afloramientos de materiales del Triás de Antequera (Peyre, 1974) y sus sedimentos presentan una composición mineralógica en la que predominan los filosilicatos (50%), el cuarzo (20%) y la calcita (20%), y están presentes, además, los feldespatos, la dolomita y trazas de halita y hematites. La muestra "hoyos" presenta altos porcentajes de illita y clorita, indicativos de un origen ligado a la meteorización de materiales triásicos. La existencia de paligorskita en trazas, bajos contenidos en Ca^{2+} y Mg^{2+} y altos de K^+ (tabla 3.7.) evidencian rasgos de alteración del material triásico del que proviene la muestra. Las muestras de las lagunas Grande y Chica presentan rasgos de alteración por la presencia de interestratificados I/Cl, interestratificados I/S y esmectitas, y la aparición de paligorskita en trazas. La escasez de Ca^{2+} en las muestras, casi todo ligado a la calcita, y la facies sulfatada - cálcica de las aguas, evidencian que este catión se encuentra disuelto en su mayor parte, y es factible su incorporación en la formación de interestratificados; este proceso debe estar produciéndose en mayor o menor grado en casi todas las lagunas estudiadas.

Lagunas costeras (desembocadura del Guadalhorce y albuferas de Adra). Los sedimentos de estas lagunas están compuestos mayoritariamente por filosilicatos, calcita, cuarzo y, en menor proporción, por dolomita hematites y halita. La fracción arcillosa incluye illita, esmectitas, clorita, caolinita y trazas de paligorskita. Los materiales provienen de la desmantelación de materiales de naturaleza metamórfica (illita y clorita) que afloran en las cuencas de los ríos Guadalhorce y Adra. Es posible que la caolinita se forme a partir de las esmectitas y la clorita, muy abundantes en el medio. Cabe destacar que, tanto en los sedimentos de las albuferas como en los de la desembocadura del Guadalhorce, los contenidos en óxidos de Na^+ y P^{6+} son elevados. En el primer caso, el Na^+ , proviene de los materiales que constituyen el sustrato de estos sistemas costeros, saturados con agua marina. El fósforo, indicador de eutrofización en las aguas, sedimenta y queda retenido temporalmente en forma de óxidos o carbonatos.

En resumen, se han identificado cuatro tipos diferentes de sedimentos, cada uno de ellos con una composición mineralógica y un grado de evolución semejantes. La mayor parte de las muestras provienen de materiales triásicos más o menos alterados; las muestras menos alteradas corresponden a las de las lagunas de Archidona y de Antequera. Parece observarse que los minerales ricos en magnesio (clorita y dolomita), abundantes en los materiales triásicos que constituyen gran parte de las cuencas en las que se sitúan las lagunas, se incorporan a éstas y se produce paulatinamente la aparición de nuevas fases minerales ricas en magnesio y estables en medios ricos en calcio y pH básico (esmectitas cálcicas). También aparece paligorskita como mineral de neoformación y se produce la pérdida de aluminio y silicio de illita y clorita.

Por último, las arcillas en las lagunas podrían actuar en cierta medida como regulador de bases, principalmente calcio, pero también magnesio, sodio etc., durante las primeras fases del secado de las lagunas. En este sentido son, como sulfatos, cloruros, carbonatos y bicarbonatos, radicales aniónicos. Una vez saturadas las estructuras químicas de los minerales de las arcillas, cuando la concentración salina del medio fuese lo suficientemente alta, las sales comenzarían a precipitar en función de su solubilidad.

3.4.4. Metales pesados

Del mismo modo que los pesticidas orgánicos en aguas naturales se degradan con el paso del tiempo, bien convirtiéndose en metabolitos, evaporándose o fotodisociándose, los metales pesados son elementos químicos, y por tanto su estructura es siempre la misma, aunque entran a formar parte de diferentes compuestos, como los complejos orgánicos. Su biodisponibilidad es en gran medida función del pH del medio.

En la tabla 3.8. se pueden observar los contenidos en metales pesados (cinc, cobre, manganeso y plomo) expresado en mg de metal por kg de sedimento, junto con valores de referencia e intervención (Alloway y Ayres, 1993), en los sedimentos de 12 de las lagunas estudiadas (mismas muestras que las utilizadas en los análisis mineralógicos y geoquímicos anteriores). Estos análisis no son suficientes para realizar una caracterización rigurosa del estado de los sedimentos, en lo que se refiere a concentración de metales pesados, pero dan una idea aproximada de los rangos en los que se encuentran

estos elementos en sedimentos de zonas húmedas y pueden servir como dato comparativo para otros sistemas semejantes que estén afectados por contaminación de este tipo.

De los metales analizados el manganeso es el único para el cual no hay establecidos rangos de referencia ni límites de intervención. Este elemento, frecuente en los minerales de las arcillas, es abundante en la Naturaleza. Su presencia no supone, en principio, un peligro potencial para los suelos ni para las aguas. Las concentraciones más elevadas en los sedimentos de las lagunas estudiadas, casi 700 mg Mn/kg, corresponden a la laguna de Caja (tabla 3.8.), y los más bajos a la laguna Grande y Ratosá (130 y 121 mg Mn/kg, respectivamente).

El cinc, con concentraciones de intervención de 3000 mg Zn/kg, no alcanza en las lagunas estudiadas los valores de referencia (200 mg Zn/kg) ya que las mayores concentraciones detectadas han sido de 82 mg Zn/kg y cerca de 70 mg Zn/kg, en la laguna Salada y la laguna Dulce, respectivamente.

	Cinc	Valor de Referencia/Intervención	Cobre	Valor de Referencia/Intervención	Manganeso	Plomo	Valor de Referencia/Intervención
L. Dulce	68.11	200/3000	25.8	50/500	606.86	12.38	50/600
L. Camuñas	44.96	200/3000	26.76	50/500	460.28	<10.70	50/600
L. Capacete	47.85	200/3000	27.05	50/500	561.75	<10.40	50/600
L. Cerero	28.69	200/3000	13.24	50/500	297.92	13.24	50/600
L. Salada	82.27	200/3000	34.46	50/500	511.4	20.01	50/600
L. Chica	34.92	200/3000	20.74	50/500	251.01	12	50/600
L. Grande	29.84	200/3000	17.64	50/500	130.03	13.23	50/600
L. Fuente de Piedra	29.76	200/3000	14.38	50/500	318.49	11.3	50/600
L. Ratosá	20.39	200/3000	7.51	50/500	121.92	14.22	50/600
L. Caja	45.7	200/3000	29.57	50/500	685.49	22.85	50/600
L. Viso	27.34	200/3000	19.98	50/500	494.16	10.51	50/600
L. Marcela	43.72	200/3000	40.74	50/500	467.01	12.92	50/600

Tabla 3.8. Metales pesados (mg/kg de metal) en los suelos de las lagunas de Málaga y valores de referencia/intervención (Alloway y Ayres, 1993)

Cobre y Plomo son los metales pesados con menor valor de referencia/intervención de los analizados (50/500 y 50/600 respectivamente), debido a sus características ecotóxicas de bioacumulación y biomagnificación. Tampoco se sobrepasan en ninguna de las lagunas estudiadas los niveles de referencia: en la laguna de la Marcela se alcanzan valores de 40 mg Cu/kg de sedimento y en la laguna Ratosá 7.5 mg Cu/kg de sedimento. Entre estos dos valores se encuentran el resto de las lagunas estudiadas. Los valores de plomo (tabla 3.8.) son incluso menores: el máximo corresponde a la laguna de Caja (22 mg Pb/kg de sedimento).

A la vista de los resultados obtenidos, no parece que ninguna de las lagunas estudiadas esté afectada por contaminación con metales pesados, de modo que estos sistemas, atendiendo a este criterio, se encuentran en condiciones de conservación aceptables. Los resultados son coherentes con los obtenidos en aguas superficiales, en las cuales también se han analizado estos metales.

4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA

En este capítulo se sintetiza la información obtenida a partir del control de una serie de variables químicas de las aguas, algunas de las cuales han sido determinadas *in situ* y otras analizadas en laboratorio. Se incluyen también los resultados del tratamiento estadístico de los datos correspondientes. Se indica a continuación la metodología utilizada en las medidas *in situ*, en los análisis realizados en laboratorio y en el tratamiento estadístico.

4.1. Metodología

4.1.1. Características químicas

En lo que se refiere a las determinaciones *in situ*, las medidas de *conductividad eléctrica a 25 °C* del agua y de *temperatura* (variable física que en este capítulo se ha representado únicamente en los perfiles piezométricos) se realizaron con un conductivímetro marca WTW modelo LF-96. El *pH* se midió con un pHmetro WTW, modelo pH 95. El *oxígeno disuelto* se determinó con un oxímetro marca YSI, modelo 57. El control diario de estas variables se llevó a cabo con una sonda multiparamétrica de la casa Grant, conectada a un data logger modelo squirrel, que registraba una medida cada 30 minutos.

En cuanto a las variables medidas en el laboratorio, la *alcalinidad*, los *carbonatos* y los *bicarbonatos*, se cuantificaron mediante valoración potenciométrica (titriador Metrohm, 716 DMS); las concentraciones de *sulfato* y de *cloruro*, así como las de *calcio*, *magnesio*, *sodio* y *potasio* se midieron mediante cromatografía iónica (Dionex, DX300); finalmente, los contenidos en *fosfatos*, *amonio*, *nitrito*, *nitrógeno*, *clorofila "a"* y *sílice* se determinaron espectrofotométricamente (Hitachi, U-2000). Los *sólidos totales* y los *sólidos en suspensión* se han analizado mediante gravimetría; las medidas se realizaron con una balanza de precisión de la casa Pacisa, modelo Precisa 80 A-200 M. Los *metales pesados* Cu^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} se analizaron mediante espectrometría de absorción atómica (espectrómetro de absorción atómica Zeeman, modelo 4100ZL de Perkin Elmer). Los *pesticidas* (metil - paratión, lindano, endosulfán y atrazina) se analizaron mediante cromatografía gaseosa (cromatógrafo de gases de Perkin Elmer, "Autosystem Gas Chromatograph"). El error de balance iónico calculado en cada uno de los análisis de iones mayoritarios no ha superado el 5%, lo que permite considerar aceptables los resultados obtenidos.

4.1.2. Análisis estadístico

Con el tratamiento estadístico de los datos obtenidos se ha pretendido realizar una clasificación de las diferentes lagunas en función de las características físico - químicas de sus aguas, determinadas a partir de 10 campañas de muestreo litoral a lo largo de los años 1997 y 1998. La laguna de Fuente de Piedra es la única de todas las estudiadas en que se ha realizado el muestreo en dos puntos. Las variables consideradas son la conductividad eléctrica, las concentraciones de iones mayoritarios y el fósforo total, esta última variable como indicador de eutrofización de los sistemas. También se ha pretendido identificar cuales son los factores principales que influyen en las características de cada laguna.

El tratamiento estadístico (1530 datos analíticos en total) se ha realizado siguiendo técnicas del Análisis Factorial paramétrico y métodos de clasificación automática, básicamente Análisis Cluster tanto en su versión jerárquica como no jerárquica. Para ello se ha empleado principalmente el paquete estadístico Statgraphics, si bien el Análisis Cluster no jerárquico (método de las K-medias) se ha realizado mediante el paquete estadístico BMDP. De los análisis efectuados, el Factorial y el Cluster por variables tienen un carácter exploratorio, de manera previa al Análisis Cluster por individuos, que es la técnica en principio más apropiada para el objetivo que se pretende. Este Análisis, en su forma jerárquica, se ha realizado utilizando como datos de entrada las puntuaciones factoriales de cada humedal sobre cada factor anteriormente encontrado; se han calculado soluciones utilizando dos distancias (euclídea al cuadrado y ciudad) y tres esquemas de amalgamamiento (Ward, vecino más lejano y promedio) y se ha comparado el grado de similitud de estas soluciones mediante el coeficiente de Rand. Para concretar el nivel de corte del dendrograma seleccionado, se ha empleado el denominado método de Beale. El propio hecho de la jerarquía, es decir, el que un determinado individuo o cluster quede, desde una etapa, encajado en la estructura configurada y no pueda salir de ella en etapas posteriores, lleva a plantearse qué ocurriría si a los clusters se les deja la libertad de poder intercambiarse individuos en etapas posteriores, siempre y cuando ello beneficie a la claridad e interpretación de las soluciones. Esta es la finalidad de las técnicas no jerárquicas, que han sido empleadas sobre todo para comprobar la estabilidad de las agrupaciones determinadas por los métodos jerárquicos anteriores. El método utilizado ha sido el de las K-Medias de McQueen, en su versión convergente, implementada en el capítulo KM de BMDP.

Las lagunas Honda y Nueva no se han incluido en este tratamiento, ya que se está realizando actualmente un estudio específico en estas albuferas que incluye un análisis estadístico similar al que aquí se tratará (Fabián, 2002).

4.2. Concentración iónica

El estudio de la concentración iónica se ha basado en el dato de salinidad, obtenida como suma de los contenidos en los aniones y cationes mayoritarios del agua de las lagunas: SO_4^{2-} , CO_3H^- , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} . Este valor es sinónimo al Total de Sólidos Disueltos (TSD), suma de las concentraciones individuales (en peso) de los constituyentes principales de una muestra.

La conductividad eléctrica del agua constituye una medida indirecta de la salinidad, ya que no depende exclusivamente de la concentración de iones en disolución, sino también del tipo de iones. No existe ninguna fórmula que permita conocer la salinidad en función de la conductividad, aunque de modo orientativo, y para aguas no excesivamente saladas, pueden utilizarse expresiones que relacionan ambas magnitudes, admitiendo que existe entre ellas una relación lineal del tipo:

T.S.D. (mg/l) = A * C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$), en la que *A* representa una constante, cuyo valor está generalmente comprendido entre 0.6 y 0.8.

Los muestreos considerados para la elaboración de las gráficas incluidas en este apartado, han variado en función de los objetivos en cada caso; para la evolución espacio - temporal de conductividad y salinidad se han considerado todos los muestreos desde marzo de 1997 hasta mayo de 2001 (muestreo que incluye únicamente medidas de

campo). Para la clasificación según la salinidad se ha escogido el periodo desde mayo de 1997 a mayo de 1998, ya que la clasificación se ha realizado en función de la

Muestras	Fechas	R.N. Laguna de Fuente de Piedra			R.N. Laguna de la Ratosa		R.N. Lagunas de Campillos	
		Aguas laguna	Aguas subterráneas (piez.)	Aguas superficiales (arroyos)	Aguas laguna	Aguas subterráneas (piez.)	Aguas laguna	Aguas subterráneas (piez. y pozos)
Primer muestreo:	marzo-97	AC	-	-	AC	-	AC	-
Segundo muestreo:	mayo-97	AC	-	-	AC	-	AC	-
Tercer muestreo:	julio-97	AC	-	-	AC	-	AC	-
Cuarto muestreo:	octubre-97	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Quinto muestreo:	diciembre-97	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Sexto muestreo:	febrero-98	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Séptimo muestreo:	mayo-98	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Octavo muestreo:	junio-98	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Noveno muestreo:	agosto-98	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Décimo muestreo:	octubre-98	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Undécimo muestreo:	diciembre-99	AM	-	-	AM	-	AM	-
Duodécimo muestreo:	marzo-00	AM	-	-	AM	-	AM	-

Muestras	Fechas	R.N. Lagunas de Archidona	Lagunas de Antequera	P.N. Guadalhorce	R.N. Albuferas de Adra		
		Aguas laguna	Aguas laguna	Aguas laguna	Aguas laguna	Aguas subterráneas (piez.)	Acequias
Primer muestreo:	marzo-97	AC	AC	AC	AC	-	-
Segundo muestreo:	mayo-97	AC	AC	AC	AC	-	-
Tercer muestreo:	julio-97	AC	AC	AC	AC	-	-
Cuarto muestreo:	octubre-97	AC	AC	AC	AC	-	-
Quinto muestreo:	diciembre-97	AC	AC	AC	AC	-	-
Sexto muestreo:	febrero-98	AC	AC	AC	AC	-	-
Séptimo muestreo:	mayo-98	AC	AC	AC	AC	-	-
Octavo muestreo:	junio-98	AC	AC	AC	AC	-	-
Noveno muestreo:	agosto-98	AC	AC	AC	AC	-	-
Décimo muestreo:	octubre-98	AC	AC	AC	AC	-	-
Undécimo muestreo:	diciembre-99	AM	AM	AM	AM	AM	AM
Duodécimo muestreo:	marzo-00	AM	AM	AM	AM	AM	AM

Tabla 4.1. Periodos de realización de las campañas y tipo de analítica de las muestras; AM: análisis de mayoritarios, AC: análisis completo

salinidad media, y por ello es más conveniente escoger un periodo anual. Siempre que se haga referencia a medias de salinidad, por tanto, éstas serán relativas al periodo mencionado. Este periodo corresponde a una situación de máxima inundación de las lagunas, al menos durante la última década del siglo XX, ya que los años hidrológicos 95/96, 96/97 y 97/98 fueron, en este sector, los más lluviosos de ésta. Por tanto, la clasificación que para estos sistemas aquí se presenta debe siempre tomarse como referencia de periodos húmedos. En la tabla 4.1. se señalan los periodos de muestreo considerados en este apartado y el tipo de análisis realizado en cada uno de ellos; es necesario mencionar que, debido a que en las albuferas de Adra la investigación ha continuado hasta la actualidad, es posible que algunas gráficas en estos sistemas no se correspondan exactamente con las fechas indicadas en la anteriormente mencionada tabla 4.1.

4.2.1. Evolución espacio – temporal de la conductividad y la salinidad en aguas superficiales y subterráneas

El estudio de la evolución espacio - temporal de la conductividad y la salinidad se ha realizado para todos los humedales seleccionados, y para las aguas de piezómetros y arroyos en el caso de los humedales en los que existan tales puntos de muestreo. En la figura 4.1. se puede observar la localización de los distintos puntos de muestreo de aguas superficiales y subterráneas en los sistemas estudiados.

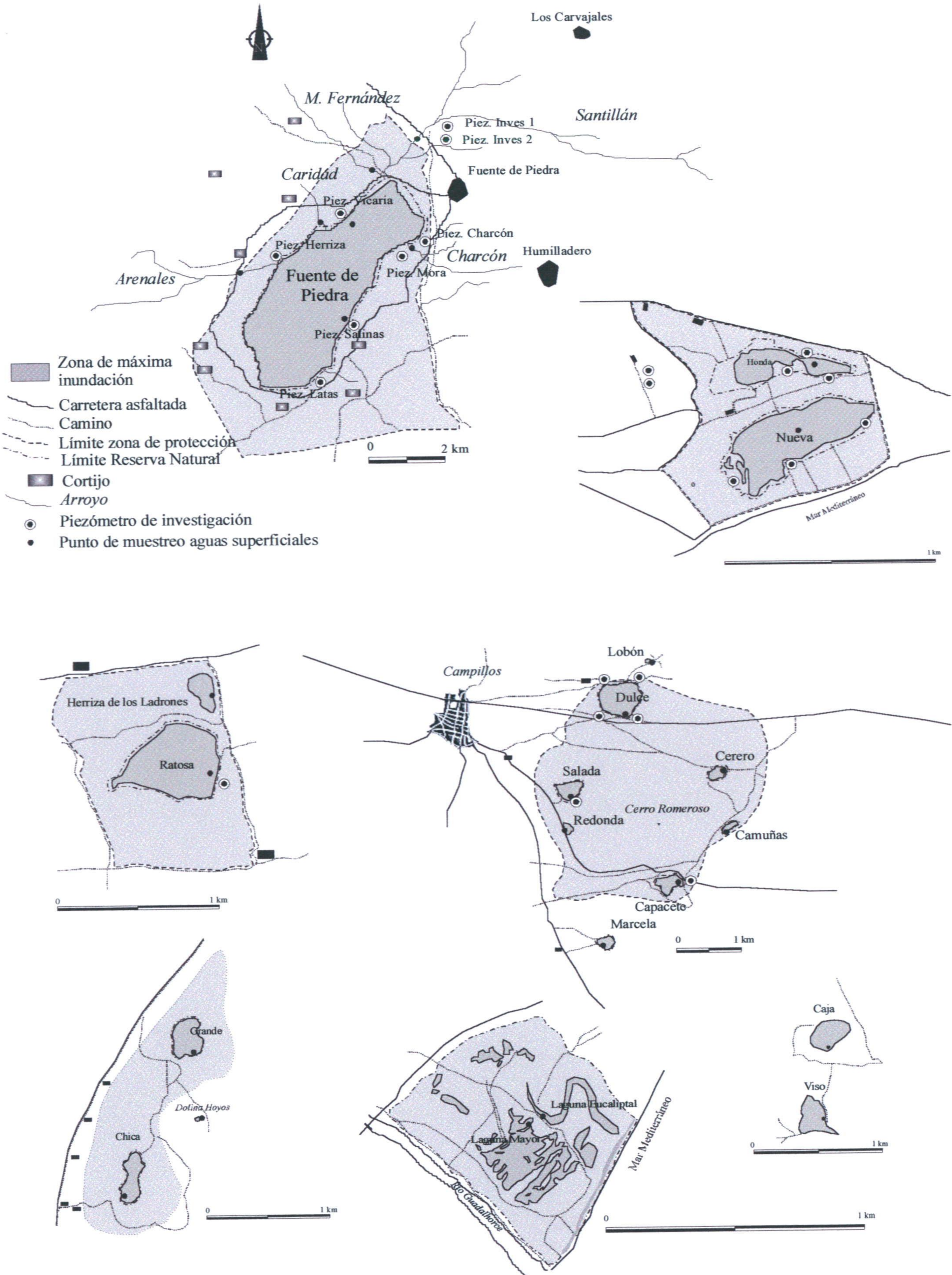


Figura 4.1. Localización de puntos de muestreo en las lagunas estudiadas

4.2.1.1. Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra

En los puntos de muestreo de agua superficial considerados en este caso, Vicaria y Salinas, se ha medido una evolución de la salinidad del agua de la laguna similar (figura 4.2.). En el año hidrológico 97/98, se observan las salinidades más elevadas coincidiendo con el final del estiaje, y las mínimas entre marzo y mayo. En los siguientes años la frecuencia de las medidas es menor, y parece apreciarse un incremento en la salinidad durante el año 99/00. La influencia en la zona de "Vicaria" del arroyo Santillán, cercano al punto de muestreo, no parece significativa. De hecho, en el periodo de máxima dilución de la laguna, durante el año hidrológico 97/98, se observa en los muestreos del arroyo Santillán un incremento en la salinidad importante que no afecta en absoluto a la laguna, debido a la existencia del canal perimetral que intercepta los flujos de agua de los arroyos hacia ésta.

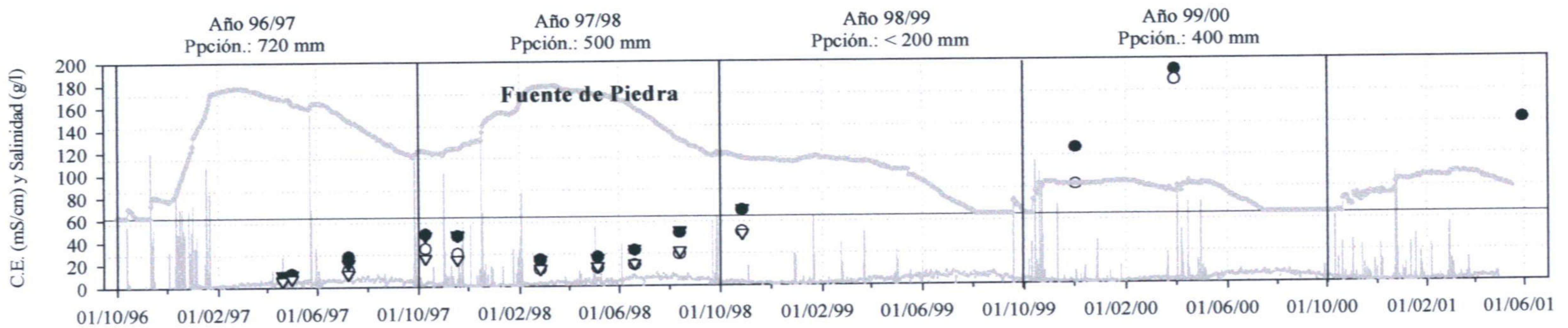


Figura 4.2. Evolución de la C.E. (en negro) y la salinidad (en blanco) en los puntos de muestreo Salinas (triángulos) y Vicaria (círculos) de la laguna de Fuente de Piedra

En los arroyos de Fuente de Piedra, muestreados durante el periodo de octubre de 1997 a mayo de 1998, se observan comportamientos diferentes. El agua del arroyo

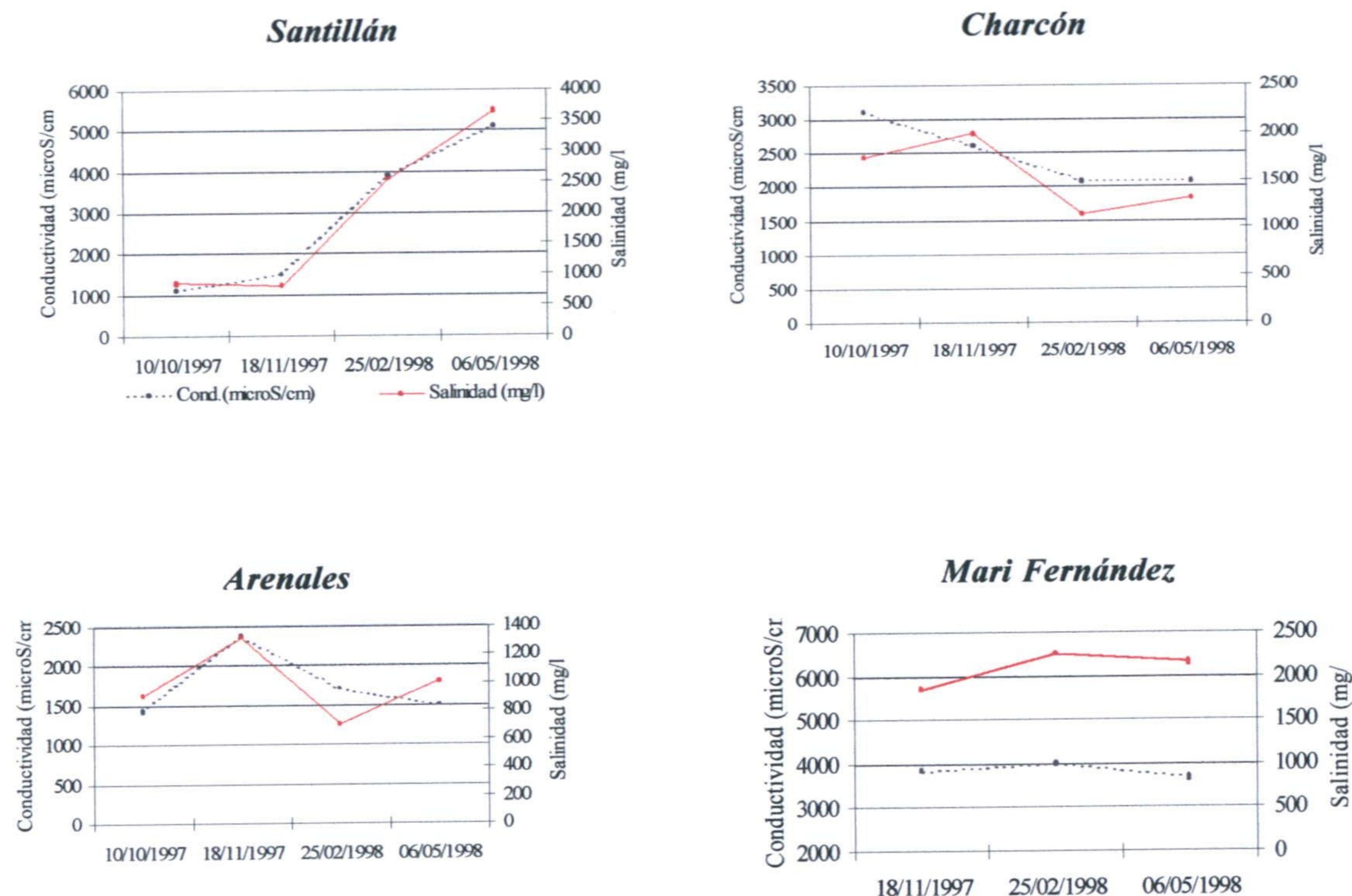


Figura 4.3. Evolución de la salinidad y la C.E. del agua de los principales arroyos de Fuente de Piedra

Santillán experimenta un incremento de su salinidad entre noviembre y mayo, mes en el que la salinidad alcanza los 3.6 g/l, la mayor de las registradas en los arroyos muestreados (figura 4.3.). En el agua del arroyo Charcón, el segundo en importancia después del anterior, la evolución de la salinidad se asemeja a la de la laguna, con un máximo en noviembre y un mínimo en febrero, al igual que en el arroyo Arenales. Por último, el pequeño arroyo de Mari Fernández, cercano al Santillán, estaba seco en el muestreo de octubre y tan sólo se han representado tres puntos.

Para estudiar la evolución temporal de la salinidad en las aguas subterráneas en el entorno inmediato de la laguna de Fuente de Piedra, se han representado los datos correspondientes a cinco de los ocho piezómetros que se controlan en ésta. Las muestras han sido tomadas aproximadamente a 1 m de profundidad, mediante un tubo metálico provisto de una válvula de pie. Con este dispositivo es inevitable que se produzca una cierta mezcla de agua de diferentes profundidades.

Se han analizado muestras recogidas de octubre de 1997 a noviembre de 1998 para los piezómetros Salinas, Herriza y Vicaria. Durante este periodo se observa en los tres piezómetros una evolución de la concentración parecida a la de las aguas superficiales de la laguna: descenso de la concentración de octubre a marzo. La salinidad es mucho mayor en las aguas subterráneas, en las que se llegan a alcanzar valores de 138 g/l (octubre de 1997 en el piezómetro Vicaria) mientras que la salinidad en las aguas de la laguna en el punto de muestreo de agua superficial también denominado Vicaria, en esa misma fecha, fue de 33 g/l (figura 4.2.). La salinidad de la muestra del agua del piezómetro Salinas, al menos durante el año 1997, es menor que la de los otros dos piezómetros. Este piezómetro está situado en el borde este de la laguna, mientras que los otros dos están en el borde oeste. La diferente salinidad de las aguas subterráneas de ambos bordes, se debe posiblemente a la influencia de la descarga subterránea procedente de las calizas que afloran en las pequeñas sierras carbonatadas situadas al oeste de la laguna, como la sierra de Humilladero, cuyas aguas subterráneas poseen una concentración salina media menor, mientras que buena parte de la descarga subterránea a la laguna procede de la circulación a través de los materiales haloclásticos del triás, de modo que son aguas mucho más salinas.

Se observan diferencias entre los piezómetros Inves 1 e Inves 2 (figura 4.4.), ambos situados al norte de la laguna de Fuente de Piedra, tanto en lo que respecta a la concentración salina como a la evolución temporal de la salinidad. En el piezómetro Inves 1 la concentración salina es la menor de las registradas en los piezómetros. La concentración salina aumenta entre noviembre y marzo, y este hecho tan sólo ocurre en el arroyo Santillán, como ya se ha mencionado. La proximidad entre el piezómetro y el arroyo puede ser la causa más probable de este comportamiento. En el piezómetro Inves 2 la salinidad disminuye desde noviembre a marzo (figura 4.4.).

Se han realizado perfiles de conductividad - temperatura, en función de la profundidad, en los piezómetros perforados alrededor de la laguna. Estos perfiles muestran la localización de la interfase agua dulce - agua salada en cada punto de la laguna en una fecha concreta, es decir, la profundidad a la que se encuentra en cada momento la salmuera bajo la laguna. La existencia de dicha salmuera ha sido ya estudiada anteriormente (Carrasco, 1992; Benavente *et al.*, 1996). El seguimiento de la posición de la interfase es interesante debido a que las variaciones anuales pueden ser significativas en función, fundamentalmente, de las precipitaciones.

En el piezómetro Herriza (figura 4.5.) la interfase se encuentra claramente definida a una profundidad comprendida entre medio metro y dos metros.

En el piezómetro Salinas, la interfase se encuentra a una mayor profundidad, y el gradiente de salinidad es menor que en los otros piezómetros. Este hecho puede ser debido, como se comentó anteriormente, a la influencia de los acuíferos carbonáticos existentes al este de la laguna.

En el piezómetro Vicaria las condiciones son muy similares a las del piezómetro Herriza: la interfase está bien definida entre medio metro y dos metros de profundidad.

En el piezómetro Inves 2, la conductividad eléctrica del agua disminuye desde noviembre a marzo y la interfase se sitúa a cuatro y a nueve metros de profundidad respectivamente (figura 4.5.). Se han representado, en la misma gráfica, perfiles correspondientes al periodo 1992/93, periodo más seco en el cual no se aprecia esta interfase. En el piezómetro Inves 1, la interfase está situada a tres metros de profundidad en noviembre y a siete metros en marzo.

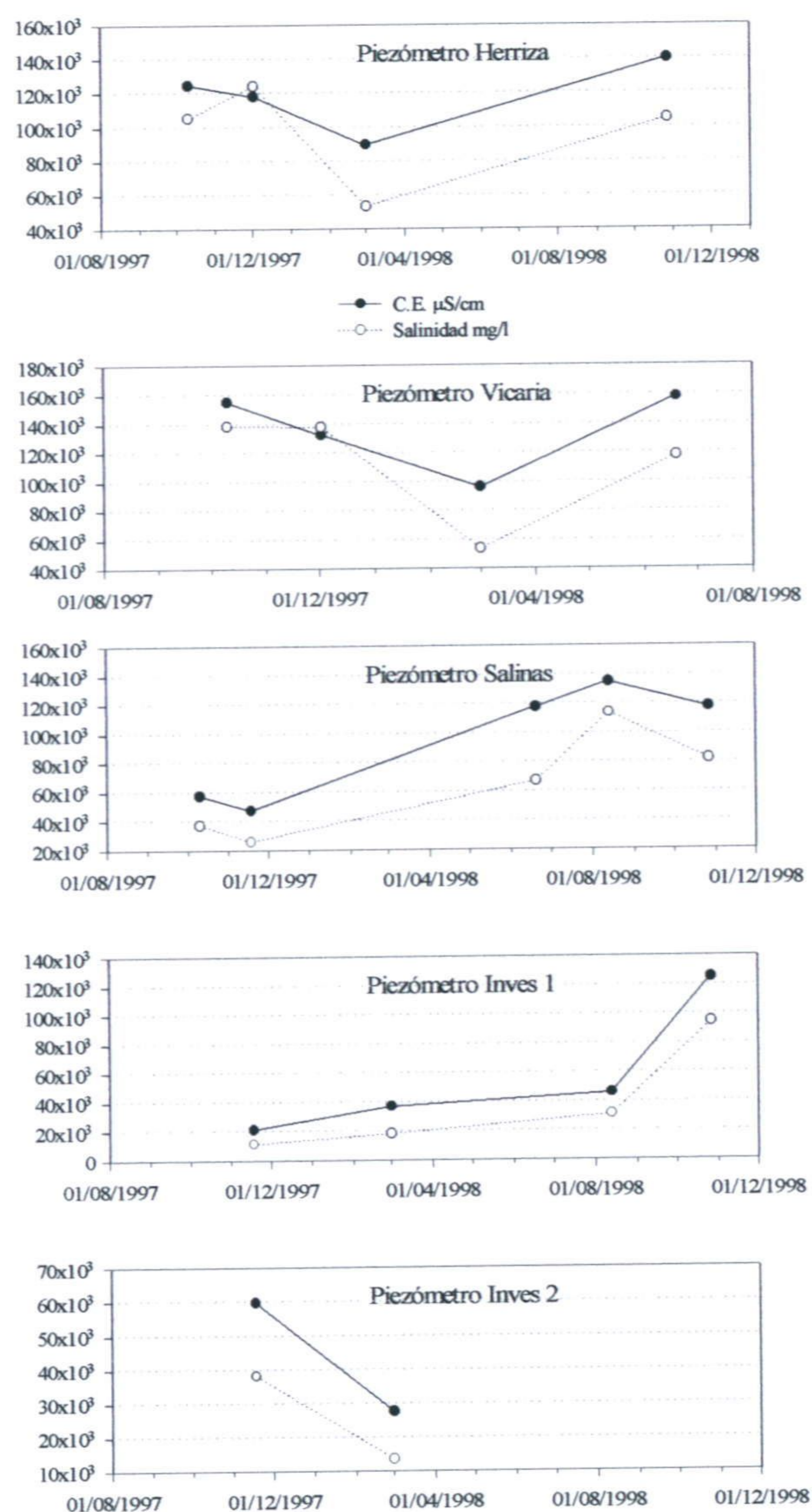


Figura 4.4. Evolución de la C.E. y la salinidad del agua de los piezómetros de la laguna de Fuente de Piedra

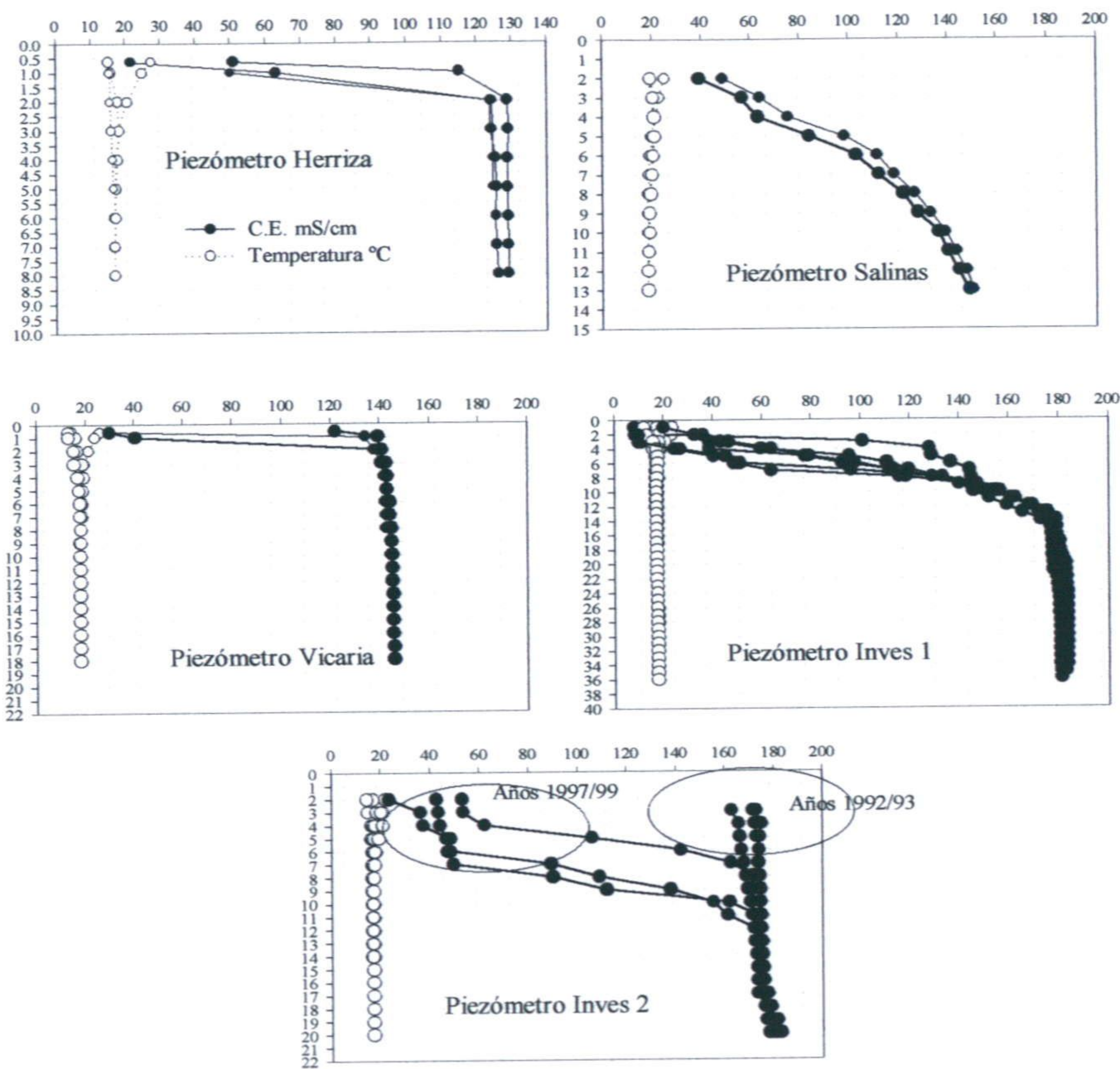


Figura 4.5. Perfiles C.E. - profundidad realizados en los piezómetros Herriza, Salinas y Vicaria durante los años 1997/99 e Inves 1 y 2 durante el periodo 1992/93 y 1997/99

4.2.1.2. Reserva Natural Laguna de la Ratosa

La evolución de la salinidad en la laguna de la Ratosa es similar a la evolución en la laguna de Fuente de Piedra (figura 4.6.). La concentración salina es menor: 4.2 g/l de media frente a 6.3 y 9.1 g/l en Salinas y Vicaria respectivamente. En el mes de mayo de 2001 se midió la C.E. del agua más elevada (29 mS/cm).

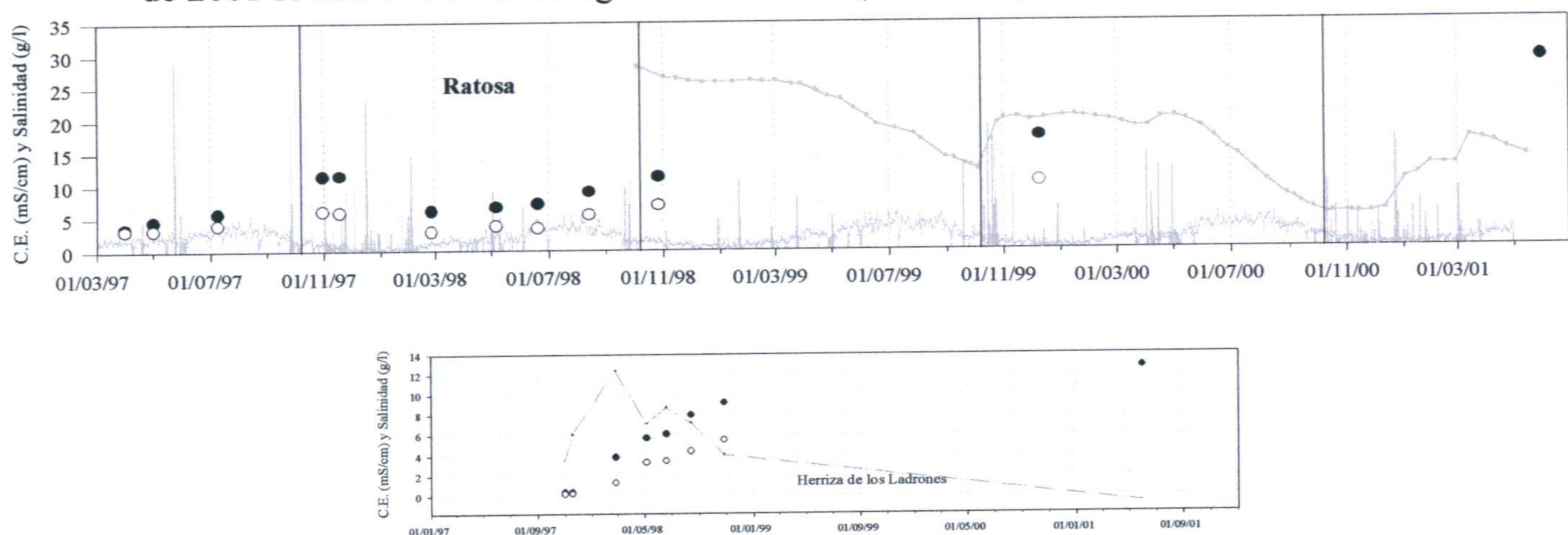


Figura 4.6. Evolución de la C.E. (en negro) y la salinidad (en blanco) en las lagunas de la Ratosa y la Herriza de los ladrones

La salinidad de las aguas subterráneas en el entorno de la laguna de la Ratosa se mantuvo durante el periodo muestreado (tabla 4.1.) en un rango entre 4.5. y 5 mS/cm (figura 4.7.). En mayo de 2001 la C.E. del agua subterránea medida fue de 8.6 mS/cm. El perfil de conductividad y temperatura realizado el 18 de noviembre de 1997 (figura 4.8.) muestra que la interfase se encontraba entre 8 y 10 metros de profundidad. El valor de la C.E. se estabiliza en 30 mS/cm, a partir de 10 metros de profundidad.

La salinidad del agua de la Herriza de los Ladrones evoluciona de una manera diferente a la del resto de las lagunas, ya que se encontraba seca al principio de los muestreos y se inunda con las primeras lluvias del año 1997. La salinidad del agua de esta laguna es extremadamente baja, 0.1 g/l en octubre de 1997 (figura 4.6.), debido a

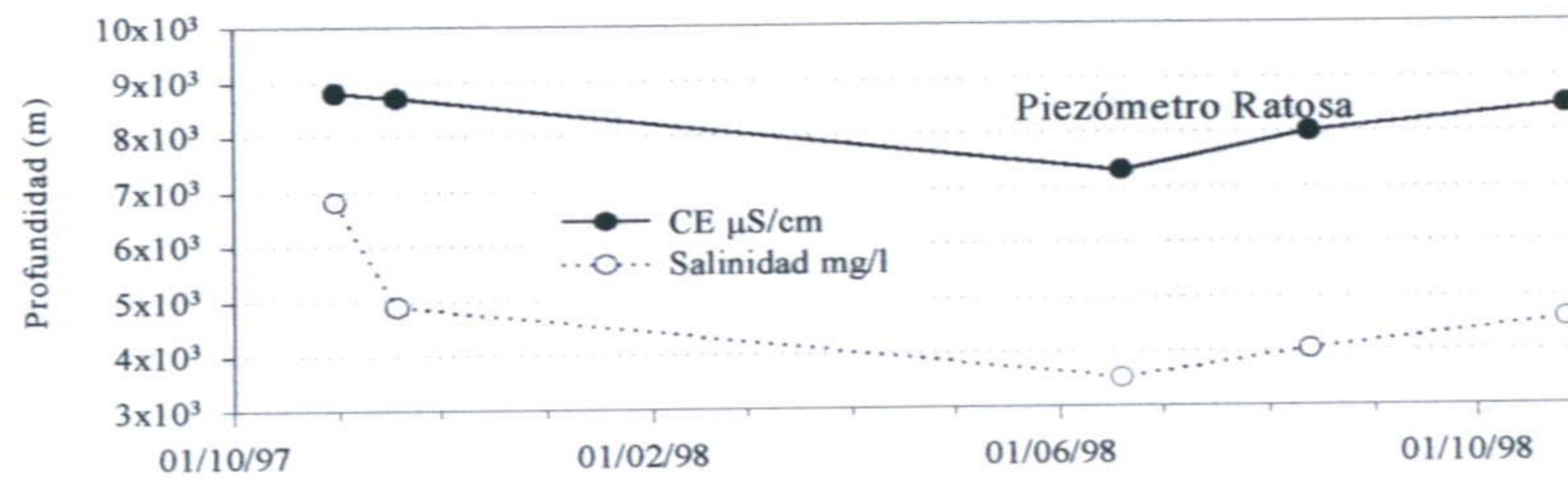


Figura 4.7. Evolución de la C.E. y la salinidad del agua del piezómetro Ratosa

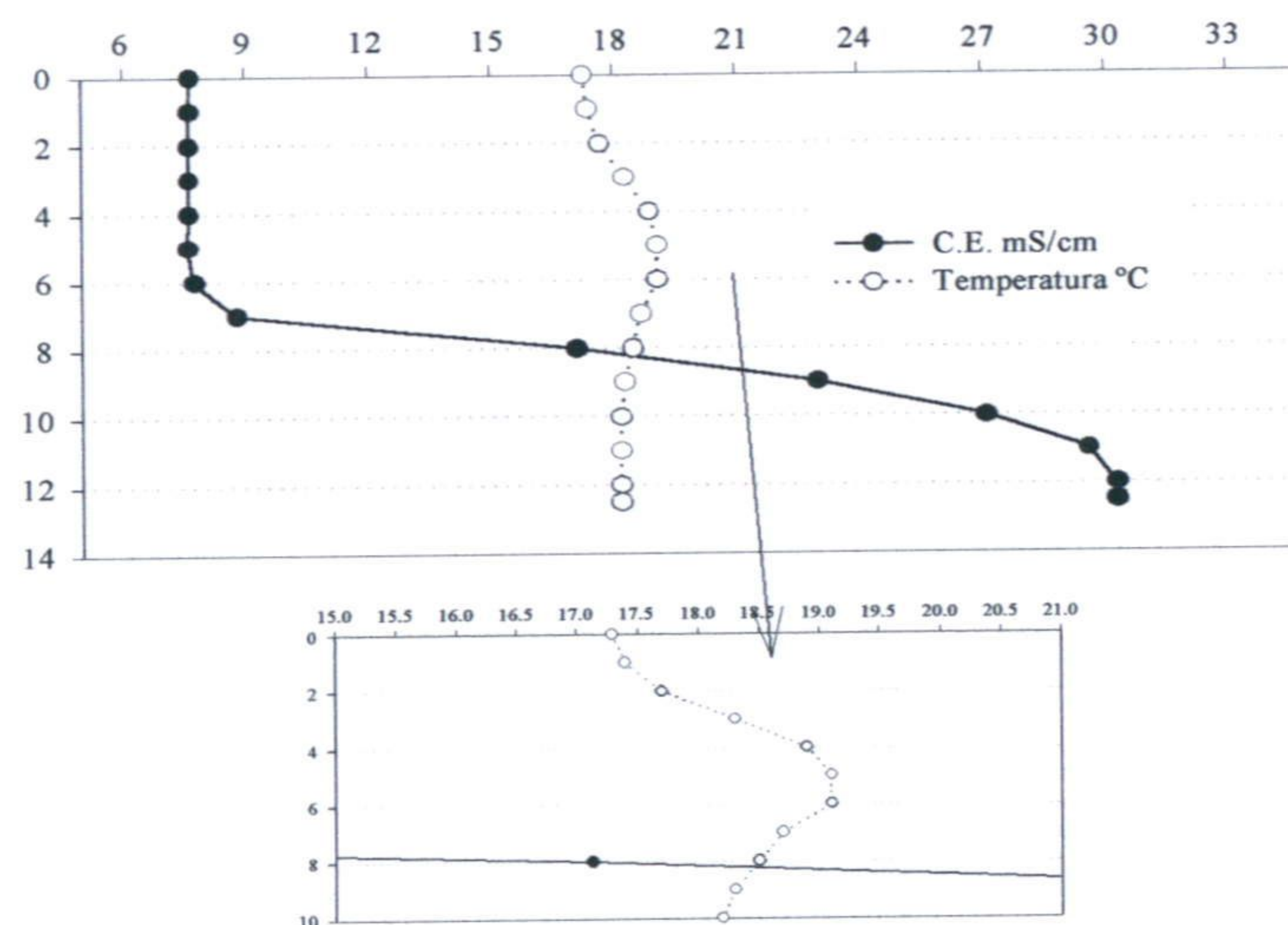


Figura 4.8. Perfil de C.E. y temperatura – profundidad realizado en el piezómetro Ratosa el 18/11/1997

que las entradas son, principalmente, aguas de precipitación y flujo subsuperficial. Con el aumento de los niveles de la laguna de la Ratosa, a finales del citado año, ambas

lagunas se unen y se produce la consiguiente mezcla de aguas. La salinidad del agua de la Herriza de los Ladrones aumenta posteriormente hasta hacerse prácticamente igual a la de la Ratosa, en torno a 3.5 g/l.

4.2.1.3. Reserva Natural Lagunas de Campillos

El rango de salinidades que se ha medido durante los años 1997 y 1998 en la laguna Dulce de Campillos es relativamente estrecho. Así, la desviación respecto a la media de la salinidad (2 g/l) es la menor de todas las lagunas de Campillos. En esta laguna, así como en las lagunas Salada, Lobón, Capacete y Cerero, se realizaron medidas semanales de C.E. del agua durante un periodo de 5 meses, desde noviembre de 1999 a marzo de 2000, con el objeto de estudiar la evolución de la salinidad a menor escala. Durante este periodo la laguna se secó, y se observó un gran incremento de la salinidad en un periodo de tiempo muy corto. En este caso, la C.E. del agua se mantuvo en torno a 20 mS/cm hasta principios de marzo de 2000; ente el 1 y el 11 de marzo la C.E. pasa de 23 a 33 mS/cm como consecuencia de, en primer lugar, un periodo muy seco que comienza en enero de 2000, y del aumento de los índices de evaporación a partir de febrero (figura 4.9.).

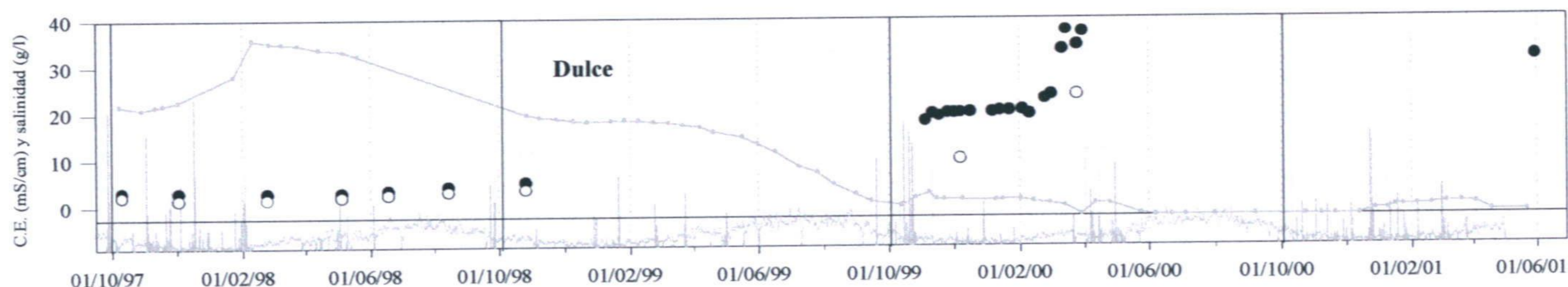


Figura 4.9. Evolución de la C.E. (en negro) y la salinidad (en blanco) en la laguna Dulce de Campillos

Las aguas de la laguna de Lobón (figura 4.11.) eran dulces (< 0.5 g/l) durante los tres primeros muestreos; abril, mayo y julio de 1997, y subsalinas (0.5 – 3 g/l) en los restantes, incluidos los meses de febrero y mayo de 1998; de hecho, la laguna experimenta un aumento en la salinidad entre mayo de 1997 y mayo de 1998 de más del 100% (313 mg/l en 1997 y 1105 mg/l en 1998). Como se comentará posteriormente, este hecho se observa en casi todas las lagunas. Entre el 1 y el 11 de marzo de 2000, la C.E. del agua asciende desde 4.3 a 7.4 mS/cm, por las mismas razones que en el caso anterior; la máxima concentración medida, el 15/3/2000, es de 9 mS/cm; la laguna se encontraba prácticamente seca.

La laguna Salada es la laguna en la que el agua presenta una mayor salinidad de todas las del complejo palustre de Campillos: su salinidad media es superior a 10 g/l (hiposalina) y llega a alcanzar los 17 g/l en diciembre de 1997 (figura 4.12.). Al igual que ocurría en la laguna anterior, se observa un aumento importante de la salinidad del agua entre mayo de 1997 y mayo de 1998 (7.4 y 11.4 g/l, respectivamente). La C.E. media durante el periodo de muestreos semanales (año 2000) fue aproximadamente de 130 mS/cm.

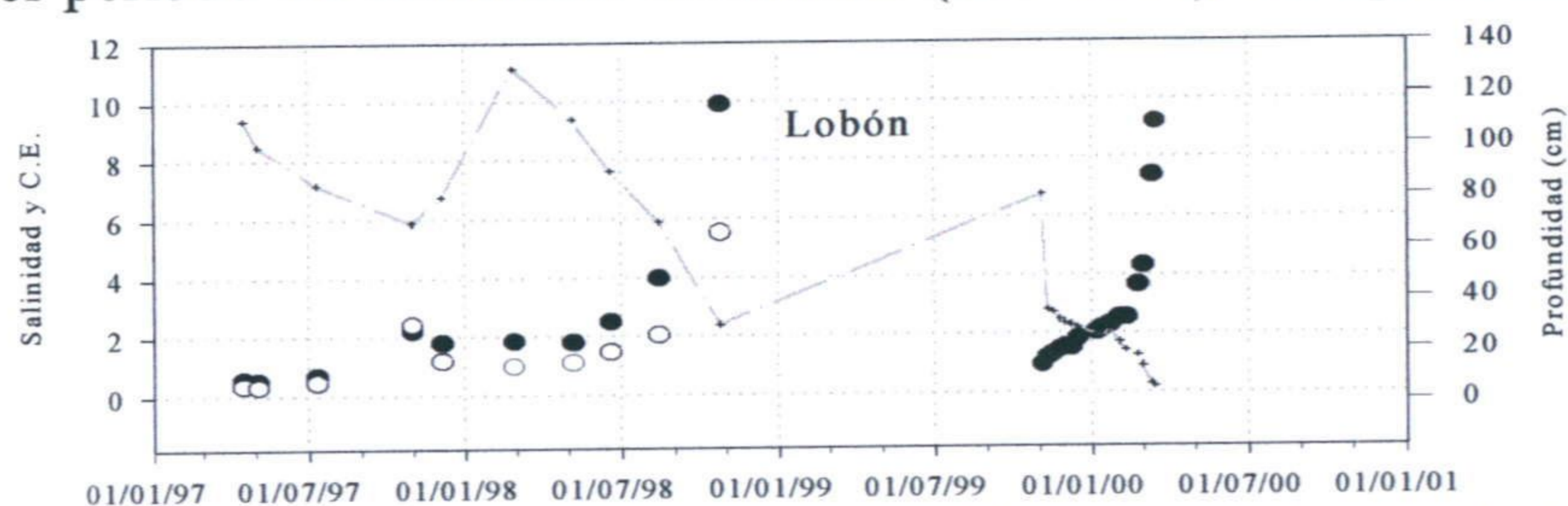


Figura 4.11. Evolución de la C.E. (en negro) y la salinidad (en blanco) en la laguna de Lobón, también se ha representado la evolución del nivel de agua

El agua de la laguna Redonda (figura 4.12. b) tenía, en las primeras campañas de muestreo (abril, mayo y julio de 1997), un rango de salinidad similar al de la laguna Salada, ya que las lagunas están situadas muy próximas entre sí y, aunque la Redonda es mucho menor y ha estado muy degradada por los vertidos de escombros en su cubeta, ambas se sitúan sobre el mismo sustrato geológico.

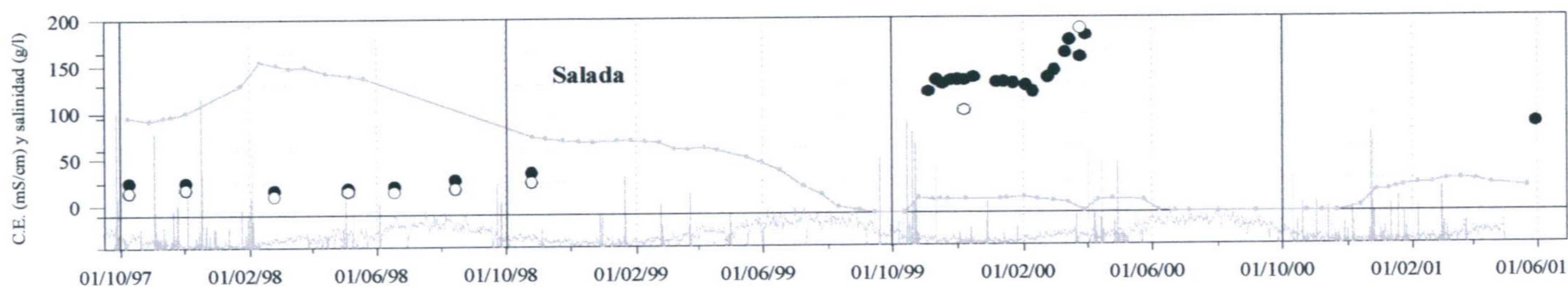


Figura 4.12. Evolución de la C.E. (en negro) y la salinidad (en blanco) en la laguna Salada de Campillos

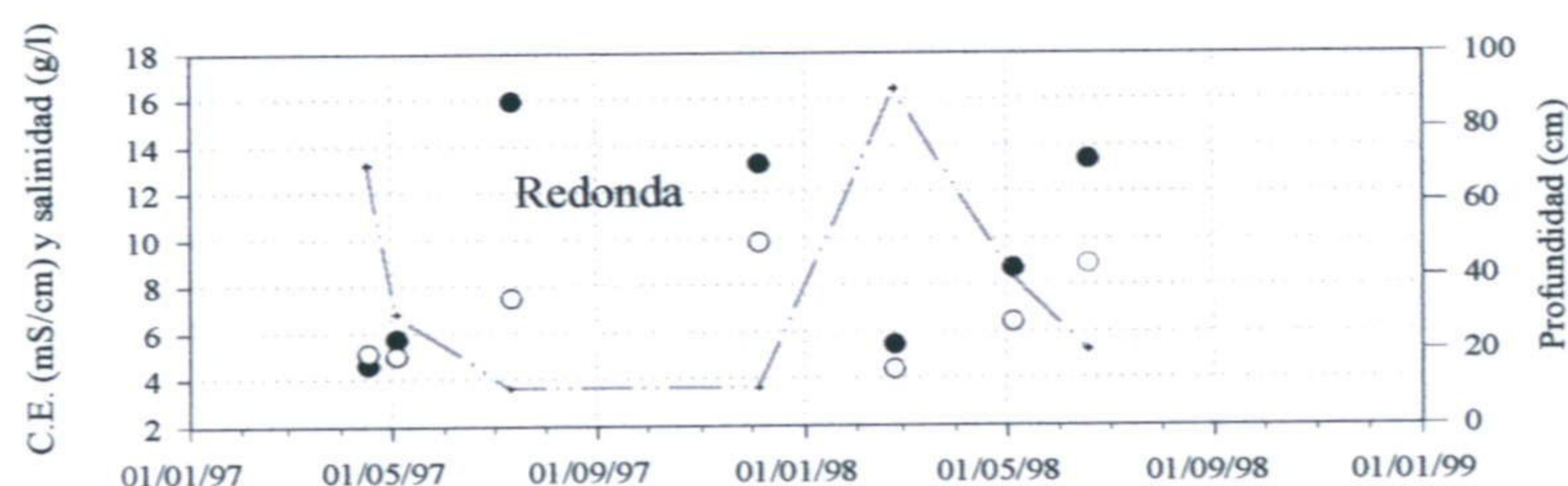


Figura 4.12.b Evolución de la C.E. (en negro) y la salinidad (en blanco) en la laguna Redonda, también se ha representado la evolución del nivel de agua

La laguna de Capacete (figura 4.13.), con valores medios de salinidad del agua de 4.3 g/l, presenta variaciones anuales influenciadas por los procesos de evaporación, como el resto de las lagunas. Esta laguna recibe aportes de la laguna de Camuñas por medio de un canal. Este hecho debe modificar su salinidad, aunque la cuantificación de la cantidad de sales recibida es complicada, ya que el canal está la mayor parte del tiempo estancado y solamente cuando aumentan mucho los niveles puede medirse con facilidad el flujo. Las medidas semanales de C.E. se realizaron desde principios de noviembre hasta mediados de diciembre de 1999, fecha en que la laguna se secó. El incremento de salinidad se produjo, pues, antes que en el resto de las lagunas: entre el 17 y el 25 de noviembre; la C.E. del agua pasó de 25 a 33 mS/cm. Esta laguna permaneció seca durante la práctica totalidad del año 99/00.

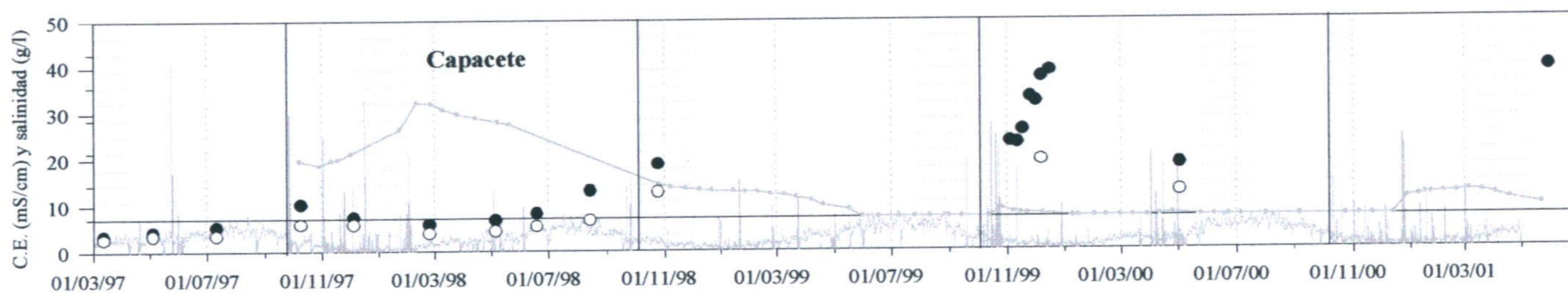


Figura 4.13. Evolución de la C.E. y la salinidad en la laguna de Capacete

La laguna de Cerero presenta aguas hiposalinas (3 – 20 g/l). Durante el periodo de medidas semanales, es la única laguna de las estudiadas que mantuvo constante la lámina de agua y no se secó, aunque la C.E. del agua aumentó a partir de marzo de 2000 debido a la intensa evaporación (figura 4.14). Este hecho se puede interpretar como una evidencia más, tras la interpretación de los balances hídricos del capítulo anterior, de aportes subterráneos a la laguna, ya que las precipitaciones fueron nulas durante este periodo.

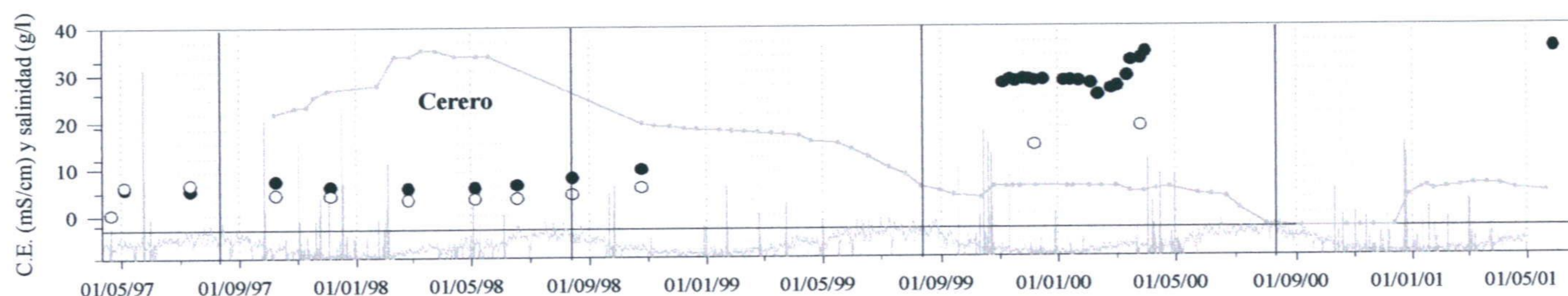


Figura 4.14. Evolución de la C.E. y la salinidad en la laguna de Cerero

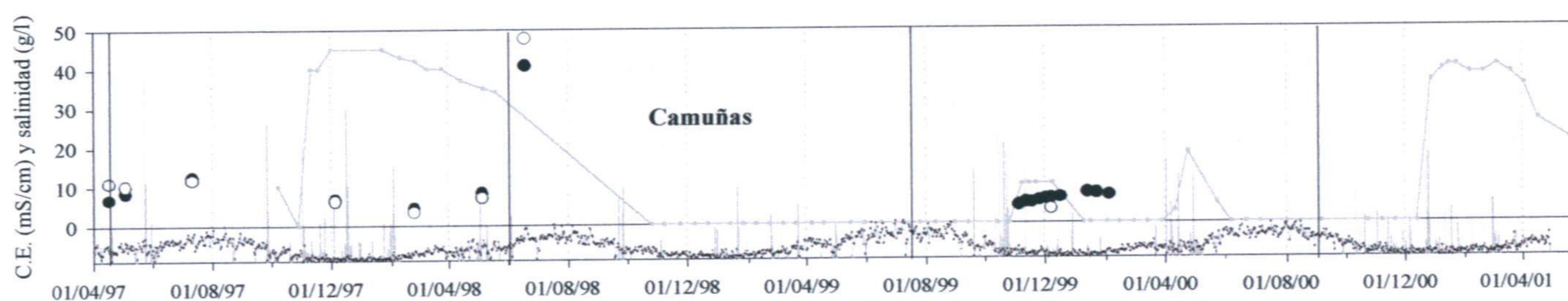


Figura 4.15. Evolución de la C.E. y la salinidad en la laguna de Camuñas

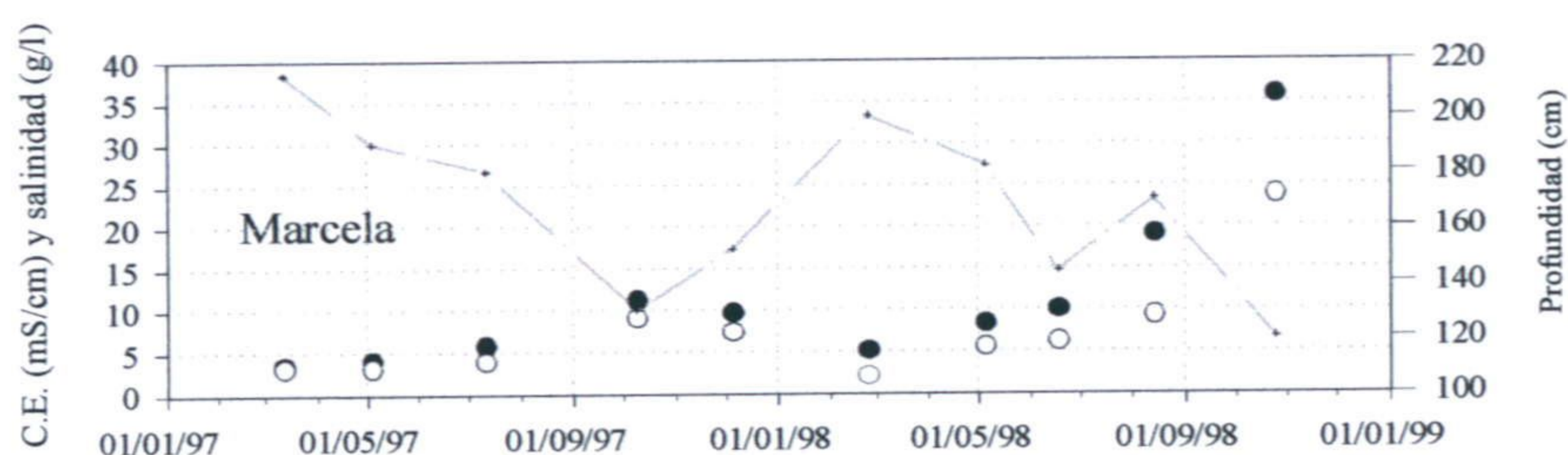


Figura 4.16. Evolución de la C.E. y la salinidad en la laguna de Marcela, también se ha representado la evolución del nivel de agua

La laguna de Camuñas (figura 4.15.) presenta aguas con salinidad en torno a los 10 g/l. Se secó en febrero de 2000, algo más tarde que la laguna de Capacete, tras alcanzar sus aguas una C.E. cercana a 10 mS/cm.

El agua de la laguna Marcela es hiposalina (figura 4.16.) y la evolución de la salinidad resulta ser similar a la de la laguna de Capacete.

En relación con los piezómetros existentes en el sector de Campillos, se han realizado perfiles en los piezómetros Dulce SE y Dulce NW. En el primero, la interfase se encuentra a una profundidad aproximada de cinco metros (figura 4.10). La salinidad del agua llega a alcanzar un valor de 21 mS/cm. Se observa también otro pequeño aumento de la C.E. del agua a 12 metros de profundidad. La temperatura del agua en el piezómetro se estabiliza en los tres perfiles en 18.2 °C, a la profundidad de cinco metros.

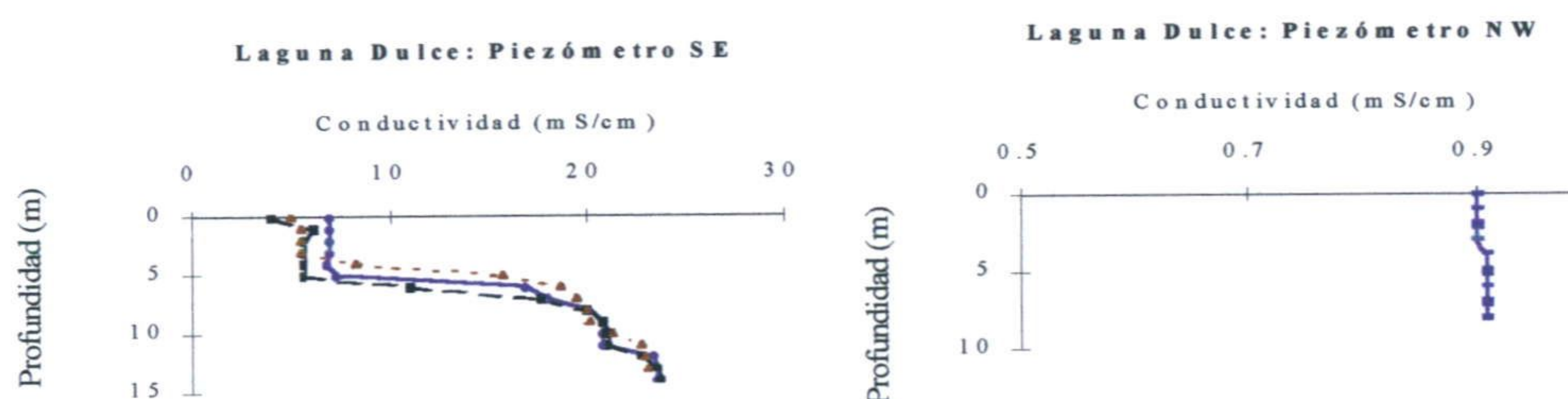


Figura 4.16. Perfiles de C.E realizados en los piezómetros SE y NW del entorno de laguna Dulce de Campillos durante el año 1998

En el perfil efectuado en el piezómetro Dulce NW no se llegó a cortar la interfase, y la C.E. del agua se mantuvo estable en torno a 1 mS/cm. El hecho de que la laguna Dulce presente unas aguas bastante menos saladas que las demás que integran este complejo palustre puede deberse a las entradas subterráneas de aguas de baja C.E. por este sector; sin embargo, para corroborar esta hipótesis, sería necesario disponer en esta zona de una red de piezómetros de la que actualmente no se dispone.

4.2.1.4. Reserva Natural Lagunas de Archidona

Las fluctuaciones anuales en la salinidad del agua de la laguna Grande de Archidona son relativamente poco importantes (figura 4.17.), si bien se sigue apreciando un pico de salinidad del agua en octubre y un descenso en el valor de dicha variable en los meses siguientes. La alimentación subterránea que presenta esta laguna es importante, ya que se encuentra situada en una zona kárstica bien desarrollada. Es la única laguna interior de Málaga con aguas permanentes. Durante el periodo de estudio, las aguas han sido subsalinas en todos los muestreos, salvo en el de octubre de 1997, que fueron hiposalinas. La desviación respecto a la media no ha sido muy alta, en relación con las demás lagunas.

Laguna Chica. Al igual que la laguna Grande, la laguna Chica presenta aguas subsalinas, en el límite con aguas hiposalinas. Esta laguna también recibe aportes subterráneos, si bien no es permanente.

En el sumidero de la dolina Hoyos, las aguas tienen menor salinidad que en las lagunas Grande y Chica; la menor salinidad registrada correspondió al muestreo de marzo de 1998 (0.5 g/l).

4.2.1.5. Lagunas de Antequera

En la laguna de Caja (figura 4.17.), que presentó aguas dulces en todas las campañas de muestreo, la salinidad media del agua es de 0.17 g/l y es en la campaña de febrero de 1999 cuando se alcanza la máxima salinidad (algo más de 0.4 g/l). La evolución de la salinidad del agua corresponde también al patrón típico de concentración por evaporación.

Las aguas de la laguna de Viso son también dulces. La máxima concentración se midió a principios de 1999, algo menos de 0.3 g/l. La salinidad media del agua es ligeramente menor que en la laguna anterior (0.14 g/l).

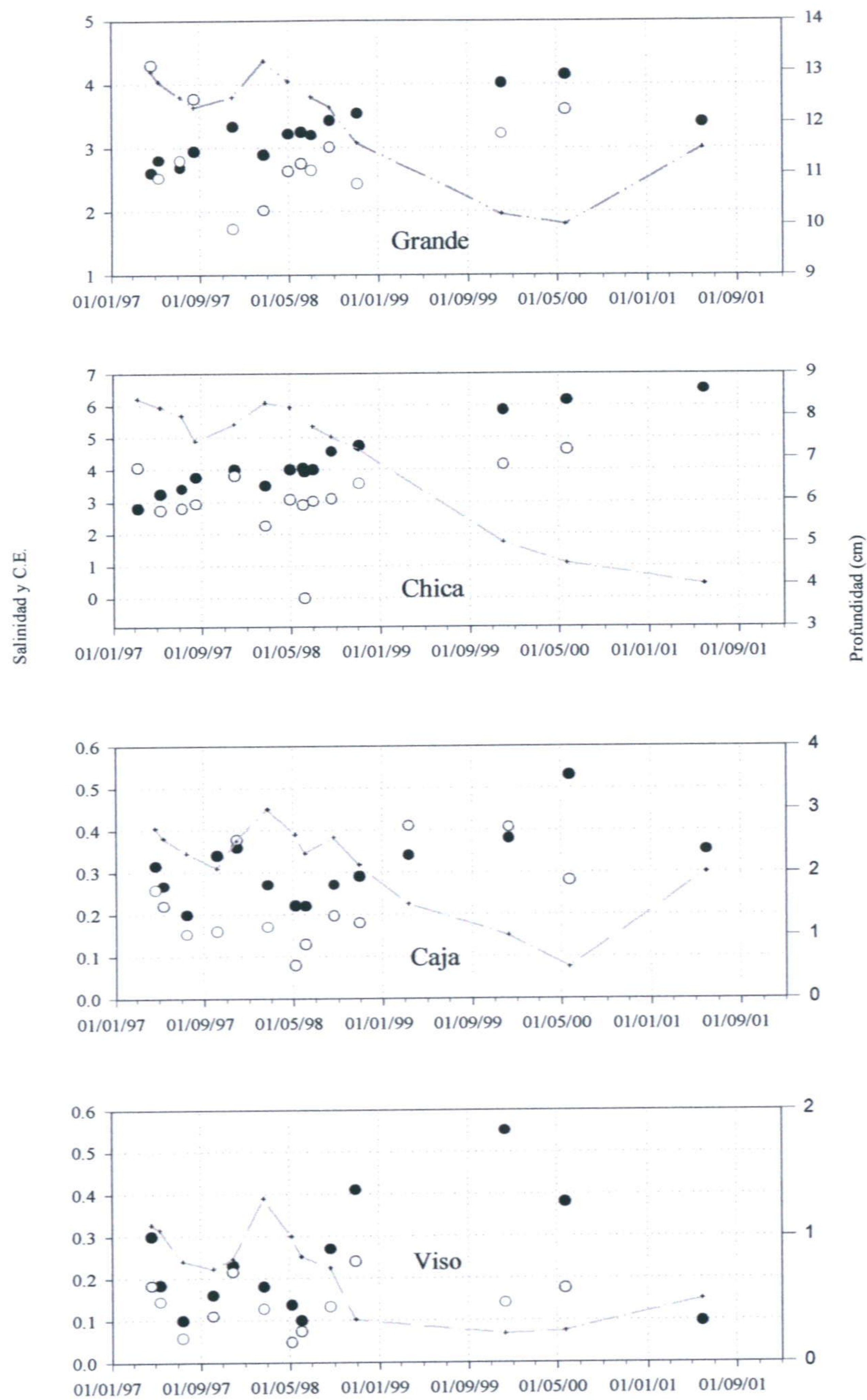


Figura 4.17. Evolución de la C.E., salinidad y nivel del agua en las lagunas Grande, Chica, Caja y Viso

4.2.1.6. Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce

Debido a que las lagunas de este complejo son de influencia marina, es decir, talásicas, no parece indicado utilizar la clasificación de salinidad de HAMMER (1986) sino la establecida en el "Symposium on the clasification of brackish waters" (Venecia, 1958). La laguna Mayor (figura 4.18.) es una laguna costera de aguas mixohalinas. Los aportes subterráneos del río Guadalhorce provocan fluctuaciones en la salinidad del agua que se alejan del patrón de evaporación que suelen seguir las lagunas interiores.

En la laguna del Eucaliptal las aguas fueron también mixohalinas en todas las campañas de muestreo.

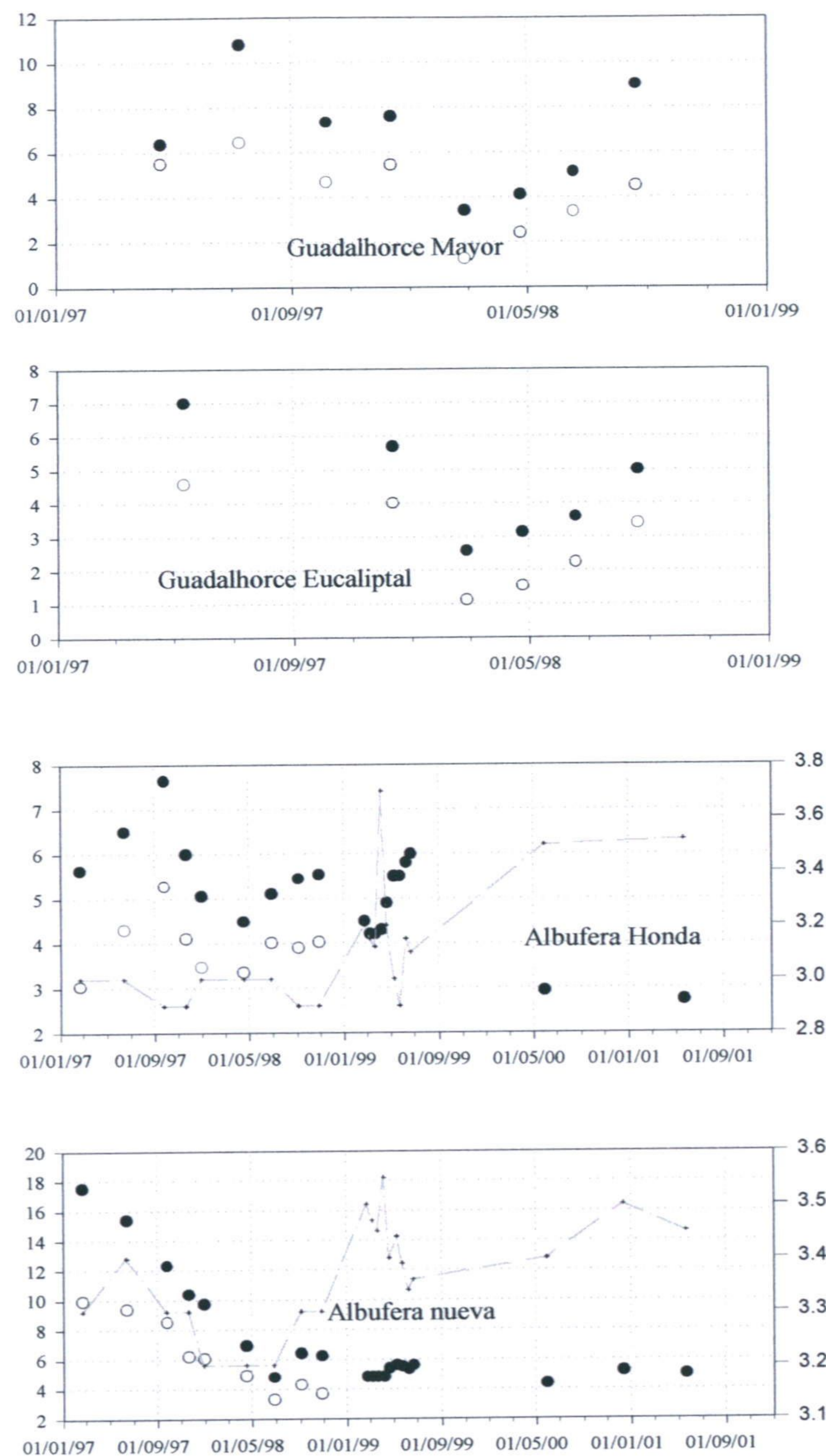


Figura 4.18. Evolución de la C.E., salinidad y nivel del agua en las lagunas de la desembocadura del Guadalhorce y Albuferas de Adra

4.2.1.7. Reserva Natural Albuferas de Adra

La albufera Nueva, situada más cerca del mar, presenta una salinidad que varía

Fecha	H_{SE}	H_S	H_N	H_O	N_S	N_O	N_E
27/01/00	-	3.23	-	-	-	-	-
09/02/00	-	-	-	-	-	-	-
21/02/00	3.95	3.19	5.42	6.66	5.14	4.97	-
28/02/00	-	3.18	-	-	-	-	-
13/03/00	-	-	-	-	-	-	-
22/03/00	3.63	3.23	8.20	6.00	-	4.80	-
30/03/00	3.30	3.21	-	5.92	4.99	4.89	4.50
10/04/00	3.57	3.22	8.88	6.33	5.35	5.05	4.46
10/05/00	4.76	3.20	7.61	4.40	6.62	12.47	4.46
30/05/00	4.86	3.10	7.74	5.00	6.62	6.00	4.28
22/06/00	-	-	-	-	-	5.60	4.60
12/12/00	3.20	3.20	8.40	10.20	9.70	-	-
29/03/01	-	-	-	-	-	-	-
21/05/01	-	-	-	-	-	-	-
12/07/01	3.71	-	-	5.70	-	7.50	-
máximo	4.86	3.23	8.88	10.20	9.70	12.47	4.60
mínimo	3.20	3.10	5.42	4.40	4.99	4.80	4.28
media	3.87	3.20	7.71	6.28	6.40	6.41	4.46

Tabla 4.2. C.E. del agua de algunos de los piezómetros situados en la orilla de las albuferas de Adra

en torno a 6 g/l (figura 4.18.). Son aguas, por tanto, hiposalinas. A lo largo de los años 1999 y 2000 la C.E. media del agua ha tenido un valor en torno a 5 mS/cm.

La albufera Honda, más alejada del mar, tiene menor salinidad que la anterior, en torno a 3 mS/cm como media. La albufera Honda recibe caudales importantes de agua por las ramblas, lo cual también influye en que sus aguas sean más dulces. La concentración salina también ha descendido desde el año 1997 (figura 4.18.). Hay que señalar, sin embargo, que esta situación puede invertirse y, de hecho, en años anteriores así ha ocurrido. Por ejemplo, durante el periodo octubre de 1990 - diciembre de 1991 (El Amrani, 1997), el valor medio de la C.E. del agua en la albufera Honda era mayor (5.8 mS/cm) que en la albufera Nueva (5.1 mS/cm).

En la tabla 4.2. se observan los valores de C.E. (mS/cm) del agua subterránea en el entorno inmediato de las albuferas. En los piezómetros de la albufera Honda situados en su borde sur, la C.E. es similar a la del agua superficial, mientras que en los situados en los bordes norte y oeste la C.E. aumenta, lo cual requiere considerar la influencia de otros factores. En la albufera Nueva los valores son en general mayores que en la Honda, lo cual es lógico debido a que está situada más cerca del mar.

4.2.2. Clasificación de los humedales según su salinidad

La evolución espacio - temporal de la conductividad eléctrica del agua y la salinidad en estas lagunas pone de manifiesto una gran dispersión en los valores de estos parámetros en un ciclo anual. Clasificar las lagunas a partir de un valor medio de salinidad resulta válido tan sólo con fines comparativos y para el periodo de tiempo considerado, ya que la evolución interanual en estos sistemas puede conducir a que, como ocurre en estos humedales, las salinidades medias varíen de forma apreciable entre un año y el siguiente. Así, la mayoría de las lagunas que se incluyen en este estudio llegan a tener salinidades en la época de máxima concentración hasta 50 veces

Tipología	Humedal	Media	Rango
Humedales continentales - litorales			
Dulce	Herriza de los Ladrones	0.19	0.16 - 0.23
	Laguna de Viso	0.14	0.06 - 0.21
Dulce - Subsalina	Laguna de Caja	0.21	0.15 - 2.79
	Laguna de Lobón	0.95	0.31 - 2.43
Subsalina	Laguna Dulce	1.74	1.25 - 2.60
	Los Hoyos	1.35	0.85 - 2.26
Subsalina - Hiposalina	Laguna de Capacete	4.20	2.62 - 5.84
	Laguna Grande	3.02	1.72 - 4.30
	Laguna Chica	3.26	2.72 - 4.06
Hiposalina	Laguna Salada	10.6	6.11 - 17.20
	Laguna de Cerero	4.92	3.30 - 6.61
	Laguna de Camuñas	12.04	7.27 - 15.11
	Laguna de la Ratosa	4.45	3.16 - 6.09
	Laguna Redonda	6.86	5.02 - 9.81
	Laguna Marcela	5.89	3.03 - 9.03
	Albufera Honda	4.04	3.04 - 5.28
	Albufera Nueva	8.02	6.07 - 9.92
Hiposalina - Mesosalina	Laguna de Fuente de Piedra	18.37	7.79 - 33.84
Humedales costeros			
Mixohalina	Desembocadura del Guadalhorce	5.06	4.01 - 6.44

Tabla 4.3. Clasificación de los humedales estudiados en función de su rango de salinidad (g/l)

superiores a las concentraciones en la época de mayor dilución; consecuentemente, los valores medios tienen una significación relativa sólo si se consideran también las desviaciones típicas correspondientes.

Por otra parte, la clasificación de Hammer (1986), que es la que se ha utilizado en este estudio, si bien no tiene establecidos muchos tipos diferentes de aguas (tan sólo 5), puede plantear dificultades en el caso de lagunas (como la laguna Chica de Archidona) con aguas que se encuentran en el límite entre ser consideradas, por ejemplo, subsalinas o hiposalinas, de modo que podrían ser (como media) subsalinas un año e hiposalinas otro. En general, la mayoría de las lagunas se encuentran dentro del rango de las hiposalinas para el periodo de estudio considerado (no hay que olvidar que se ha tratado de un ciclo húmedo). De las lagunas de Campillos, tan sólo dos (Dulce y Lobón) son subsalinas, igual que las lagunas de Archidona (Grande y Chica). El resto de las lagunas son hiposalinas, salvo las lagunas de Antequera (Caja y Viso). En el complejo lagunar de la desembocadura del Guadalhorce, según de ha dicho, al tratarse de lagunas talásicas (de influencia marina), no puede utilizarse la clasificación de Hammer (1986), sino la establecida en el "Symposium on the classification of brackish waters" (Venecia, 1958); según esta clasificación se trata de aguas mixohalinas. En la tabla 4.3. se presenta la clasificación de los humedales estudiados según el rango de salinidad, expresado en g/l.

4.3. Composición iónica

La composición iónica de las aguas de las lagunas estudiadas se ha representado en dos tipos de diagramas: Piper y Schöeller - Berkaloff. El primero es especialmente útil para resaltar la facies hidroquímica, ya que visualiza muy nítidamente entre los constituyentes principales el anión y el catión predominantes. Por su parte, el diagrama de Schöeller - Berkaloff aporta información de los correspondientes contenidos absolutos

1) Diagrama de PIPER: Consta de dos diagramas triangulares, en los que se representa separadamente la abundancia relativa (en % de meq/l de cationes y aniones), a los que se añade un diagrama rómbico en el que se muestran, también en términos relativos, los contenidos en carbonatos y bicarbonatos frente a sulfatos y cloruros y de cationes alcalinos (sodio y potasio) frente a alcalinotérreos (calcio y magnesio). El inconveniente de este tipo de diagramas es que no indican la salinidad de las aguas, es decir, si las proporciones iónicas son idénticas, dos aguas con salinidades totalmente distintas pueden estar representadas en el mismo punto del gráfico.

2) Diagrama de Schöeller-Berkaloff: Consta de una serie de líneas verticales en escala logarítmica, una para cada uno de los constituyentes mayoritarios. Para cada muestra se obtiene una línea quebrada que informa sobre cuales son los elementos mayoritarios más abundantes. Al estar representados los contenidos iónicos en meq/l, en este diagrama se expresan los contenidos absolutos para cada uno de los constituyentes principales.

En la tabla 4.4. se representan las series iónicas obtenidas en las campañas de muestreo del ciclo anual correspondientes a cada uno de los humedales estudiados. Para expresar la secuencia iónica se ha utilizado la nomenclatura de Eugster y Hardie (1978), en la que se indican sin paréntesis los iones que se encuentran en una proporción superior al 25% y entre paréntesis los iones con una proporción entre el 5% y el 25%; no se indican los que se encuentran en una proporción inferior al 5%. Estas series se han sintetizado en un número más reducido de tipos, en función de la composición iónica predominante (tabla 4.5.).

Humedal	Campañas de muestreo					
	mayo-97	julio-97	octubre-97	diciembre-97	febrero-98	mayo-98
Campillos						
Dulce	SO ₄ -Cl/Na-Ca-(Mg)	SO ₄ -Cl/Ca-Na-(Mg)	SO ₄ -Cl/Na-Ca-(Mg)	SO ₄ -Cl-(HCO ₃)/Na-(Ca)-(Mg)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Ca-Na-(Mg)	SO ₄ -Cl/Na-Ca-(Mg)
Lobón	Cl-HCO ₃ -(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-HCO ₃ -(SO ₄)/Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(HCO ₃)-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(HCO ₃)-(SO ₄)/Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(HCO ₃)-(SO ₄)/Na-Ca-(Mg)	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)
Salada	Cl-(SO ₄)/Na-Mg	SO ₄ -Cl/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-Mg-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-Mg-(Ca)	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ /Mg-Na-(Ca)
Redonda	Cl-SO ₄ /Na-Ca-(Mg)	Cl-SO ₄ /Na-(Ca)-(Mg)	Seca	Cl-SO ₄ /Na-(Mg)-(Ca)	SO ₄ -Cl/Na-(Ca)-(Mg)	Cl-SO ₄ /Na-Ca-(Mg)
Capacete	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Ca-(Mg)	Cl-SO ₄ /Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-(Mg)-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-Mg-(Ca)
Cerero	Cl-(SO ₄)/Na	Cl-(SO ₄)/Na-Ca-(Mg)	Cl-(SO ₄)/Na-Ca-(Mg)	Cl-(SO ₄)/Na-Ca-(Mg)	Cl-(SO ₄)/Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO ₄)/Na-(Ca)-(Mg)
Camuñas	SO ₄ -Cl/Mg-Na-(Ca)	SO ₄ -Cl/Na-Mg-(Ca)	Seca	SO ₄ -Cl/Na-Mg-(Ca)	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Mg-Na-Ca	SO ₄ -Cl/Mg-Na-(Ca)
Marcela	Cl-SO ₄ /Na-(Mg)-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-(Mg)-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-(Mg)-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-(Mg)-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-SO ₄ /Na-Ca-(Mg)
Fuente de Piedra						
Salinas	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)
Vicaria	Cl/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Mg-Na-(Ca)	Cl/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)
Archidona						
Grande	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Ca-(Mg)-(Na)	SO ₄ -(Cl)/Ca-(Mg)-(Na)	SO ₄ -Cl/Ca-Mg-(Na)	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Ca-Mg-(Na)	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Ca-(Mg)-(Na)	SO ₄ -(Cl)/Ca-Mg-(Na)
Chica	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Ca-(Na)-(Mg)	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Ca-(Na)-(Mg)	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Ca-(Mg)-(Na)	SO ₄ -(Cl)-(HCO ₃)/Ca-(Na)-(Mg)	SO ₄ -Cl/Ca-Mg-(Na)	SO ₄ -(Cl)/Ca-Na-(Mg)
Antequera						
Caja	SO ₄ -HCO ₃ /Ca-(Mg)	SO ₄ -HCO ₃ /Ca-(Mg)-(Na)	HCO ₃ -SO ₄ -(Cl)/Ca-(Mg)-(Na)	SO ₄ /Ca-(Mg)	SO ₄ -HCO ₃ /Ca-(Mg)	HCO ₃ -SO ₄ -(Cl)/Ca-Mg-(Na)
Viso	HCO ₃ -(SO ₄)/Ca-(Mg)	HCO ₃ -(SO ₄)/Ca-(Mg)-(Na)	HCO ₃ -(SO ₄)/Ca-(Mg)-(Na)	HCO ₃ -(SO ₄)/Ca-(Mg)-(Na)	HCO ₃ -(SO ₄)/Ca-(Mg)-(Na)	HCO ₃ -(SO ₄)/Ca-(Mg)-(Na)
Ratosa						
Ratosa	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-Mg-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)
Herr. Ladr.	Seca	Seca	Cl-HCO ₃ -SO ₄ /Na-Ca-Mg	HCO ₃ -Cl-SO ₄ /Na-Mg-Ca	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)
D. Guadalhorce						
Mayor	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)
Eucaliptal	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)			Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(HCO ₃)-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)-(HCO ₃)/Na-(Mg)-(Ca)
Albuferas Adra						
Nueva	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)/Na-(Mg)-(Ca)
Honda	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)	Cl-SO ₄ -(HCO ₃)/Na-Mg-(Ca)

Tabla 4.4. Series iónicas obtenidas en las campañas de muestreo del ciclo anual correspondientes a cada uno de los humedales estudiados

SERIE IONICA	HUMEDALES
$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$	Guadalhorce Mayor Guadalhorce Eucaliptal Nueva Honda Ratosa Herriza de los Ladrones Lobón Salada Redonda Cerero Capacete Marcela Fuente de Piedra
$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$	Dulce Camuñas
$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	Grande Chica
$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	Caja Hoyos
$\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	Viso

Tabla 4.5. Series iónicas en función de la composición iónica predominante

4.3.1. Evolución de la concentración de iones mayoritarios en aguas superficiales

Se han tomado como ejemplo tres lagunas de diferentes características: una subsalina, de facies hidroquímica sulfatada-clorurada/sódico-cálcica (la laguna Dulce de Campillos), otra hiposalina, de facies sulfatada/cálcica (la laguna Grande de Archidona), y una dulce, de facies sulfatada-bicarbonatada/cálcica (la laguna de Caja).

En el primer caso (laguna Dulce de Campillos), la concentración de los aniones sulfato y bicarbonato coincide aproximadamente en peso (figura 4.19). En el agua de esta laguna, el anión predominante es el sulfato, seguido del cloruro. El catión predominante es el sodio.

La evolución en el contenido en cationes del agua de la laguna Grande es parecida a la de la laguna Dulce, aunque la proporción de sodio es menor que la de calcio.

El agua de la laguna de Caja, al ser dulce y sulfatada - bicarbonatada, presenta una composición iónica diferente. En primer lugar, el contenido en anión bicarbonato es mayor (en peso) que en anión sulfato. La concentración de cloruros es del mismo orden

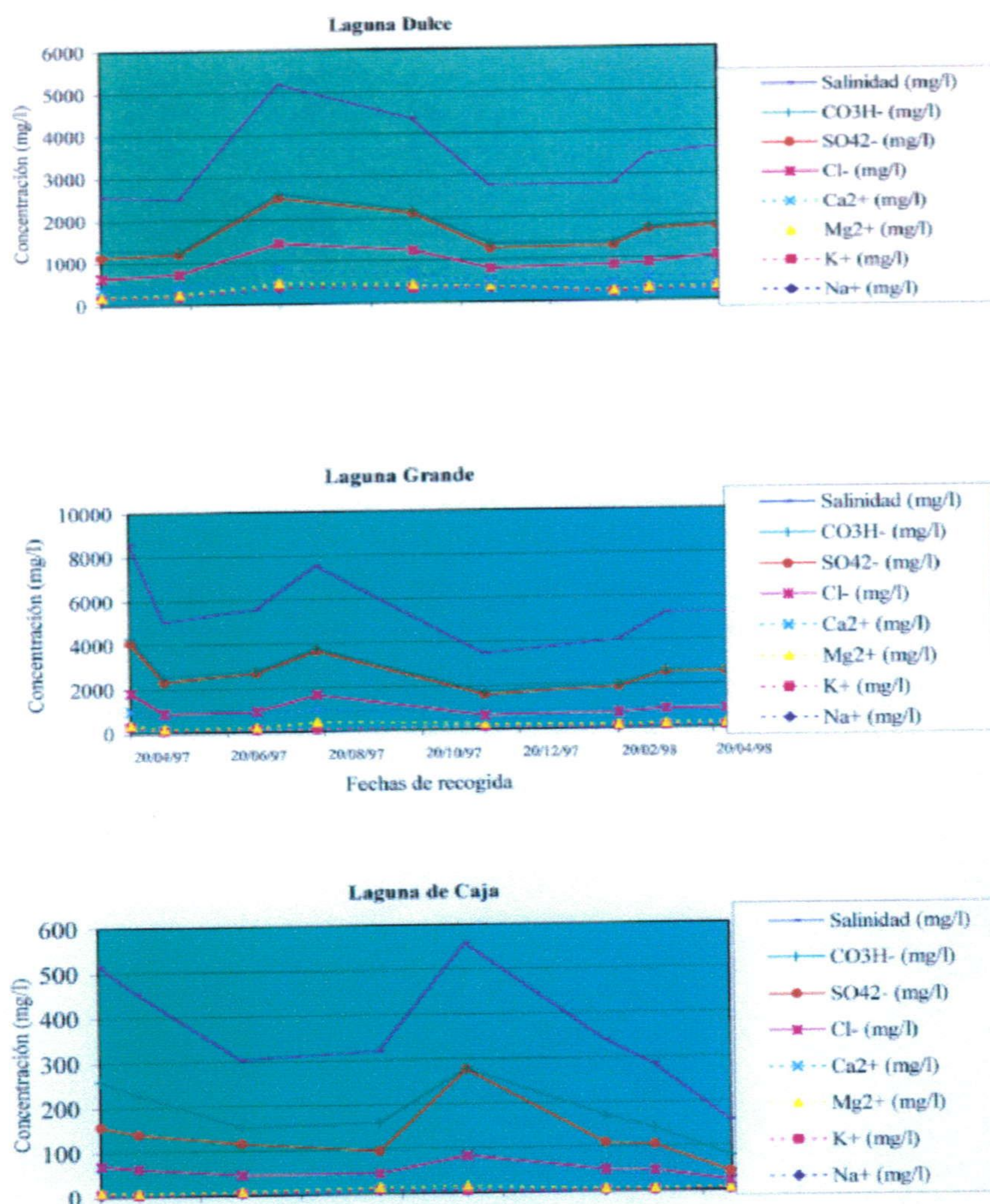


Figura 4.19. Ejemplos de evolución en los contenidos en iones mayoritarios y salinidad en tres de las lagunas incluidas en este estudio

de magnitud que la de calcio. La máxima concentración iónica se produjo en diciembre de 1997 y ni los sulfatos ni los cloruros sobrepasan los 300 mg/l.

4.3.2. Clasificación de los humedales según su facies hidroquímica

4.3.2.1. Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra

La laguna de Fuente de Piedra presenta aguas cloruradas/sódicas (figura 4.20.) que suelen ser Cl-(SO₄)/Na-(Mg)-(Ca) o, en algunas ocasiones, Cl/Na-(Mg)-(Ca) (tabla 4.4.). En Vicaria, la concentración iónica es algo mayor que en Salinas, como se puede observar en los diagramas de Schöeller-Berkaloff, y la dispersión de los valores es también algo mayor, al menos en lo que se refiere a los cationes. Los resultados de los

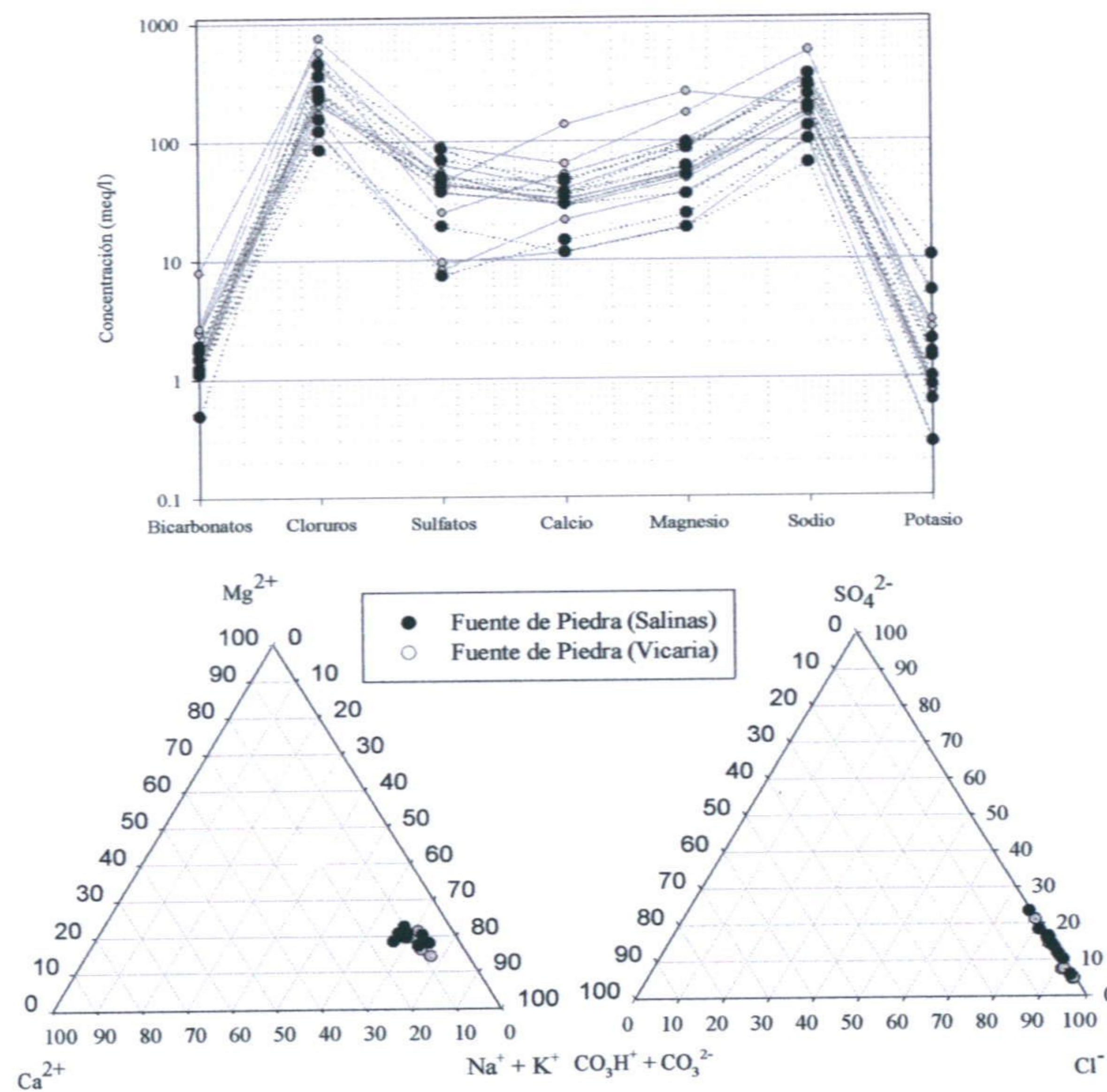


Figura 4.20. Representación de la composición iónica en las aguas de la laguna de Fuente de Piedra

análisis correspondientes al muestreo de octubre de 1997 ponen de manifiesto una facies clorurada/magnésica (tabla 4.4.), en lugar de clorurada/sódica como en el resto de los muestreos. Es en este momento cuando se alcanza la mayor salinidad en el periodo

considerado. En Salinas, la facies hidroquímica es idéntica para todos los muestreos: Cl-(SO₄)/Na-(Mg)-(Ca). Esta constancia en las características hidroquímicas se observa tan sólo en este punto de muestreo y en la laguna de la Ratosa. Debe ser consecuencia de la alta salinidad de este sistema y la permanente mezcla de sus aguas a causa del viento.

Las facies predominantes del agua subterránea en el entorno de la laguna de Fuente de Piedra son cloruradas/sódicas. Es digno de mención el hecho de que una muestra de agua obtenida en el piezómetro Latas en diciembre de 1997 presentó una salinidad sensiblemente inferior a la del resto de las muestras de otros puntos en esa misma fecha (de 5 g/l frente a los 124 g/l del piezómetro Herriza). Las peculiaridades hidroquímicas de este sector podrían ser atribuidas a la existencia de una descarga subterránea a la laguna de aguas de baja salinidad procedentes de los acuíferos ligados a los materiales carbonáticos que afloran en las sierras situadas en las cercanías de este borde de la lagunas.

La salinidad de las aguas subterráneas en los bordes de la laguna es sensiblemente mayor que la de las aguas superficiales: el sodio y el cloruro alcanzan concentraciones superiores a los 1000 meq/l.

En los análisis realizados en los arroyos que vierten a la laguna se han detectado variaciones significativas en las concentraciones aniónicas, sobre todo en el arroyo Santillán. En el mismo arroyo se han analizado aguas sulfatadas, bicarbonatadas y mixtas en distintos periodos. Las facies catiónicas han resultado ser mixtas en los cuatro muestreos efectuados.

Las facies en el arroyo Charcón son cloruradas-sulfatadas/mixtas y el agua es algo más salina que la del arroyo anterior. Es importante resaltar, en este capítulo de características químicas del agua de las lagunas, que la aportación salina procedente de los arroyos a la laguna de Fuente de Piedra es poco significativa respecto a otros procesos, como la disolución de la costra superficial y/o de la mezcla con la salmuera freática subyacente (Benavente *et al.*, 1997).

4.3.2.2. Reserva Natural Laguna de la Ratosa

Estas aguas presentan en todos los muestreos la misma facies hidroquímica: Cl-(SO₄)/Na-(Mg)-(Ca), como en la laguna de Fuente de Piedra. En el muestreo de febrero de 1998, el que menores valores de salinidad de las aguas registró, el contenido en Mg²⁺ superó el 25%, aunque seguían siendo más abundantes los cloruros. En el diagrama de Schöeller-Berkaloff (figura 4.21.) se observa la escasa variabilidad, en lo que se refiere a la concentración iónica, que presentan los resultados de todos los análisis del ciclo estudiado. Este diagrama es muy semejante al de Fuente de Piedra - Salinas, si bien en este último la concentración tiene un rango de un orden de magnitud mayor (1000 meq/l).

Las facies hidroquímicas en el piezómetro de la Ratosa son diferentes en los dos muestreos efectuados: son sulfatadas en octubre de 1997 y cloruradas en noviembre de 1997, debido a un incremento de la concentración.

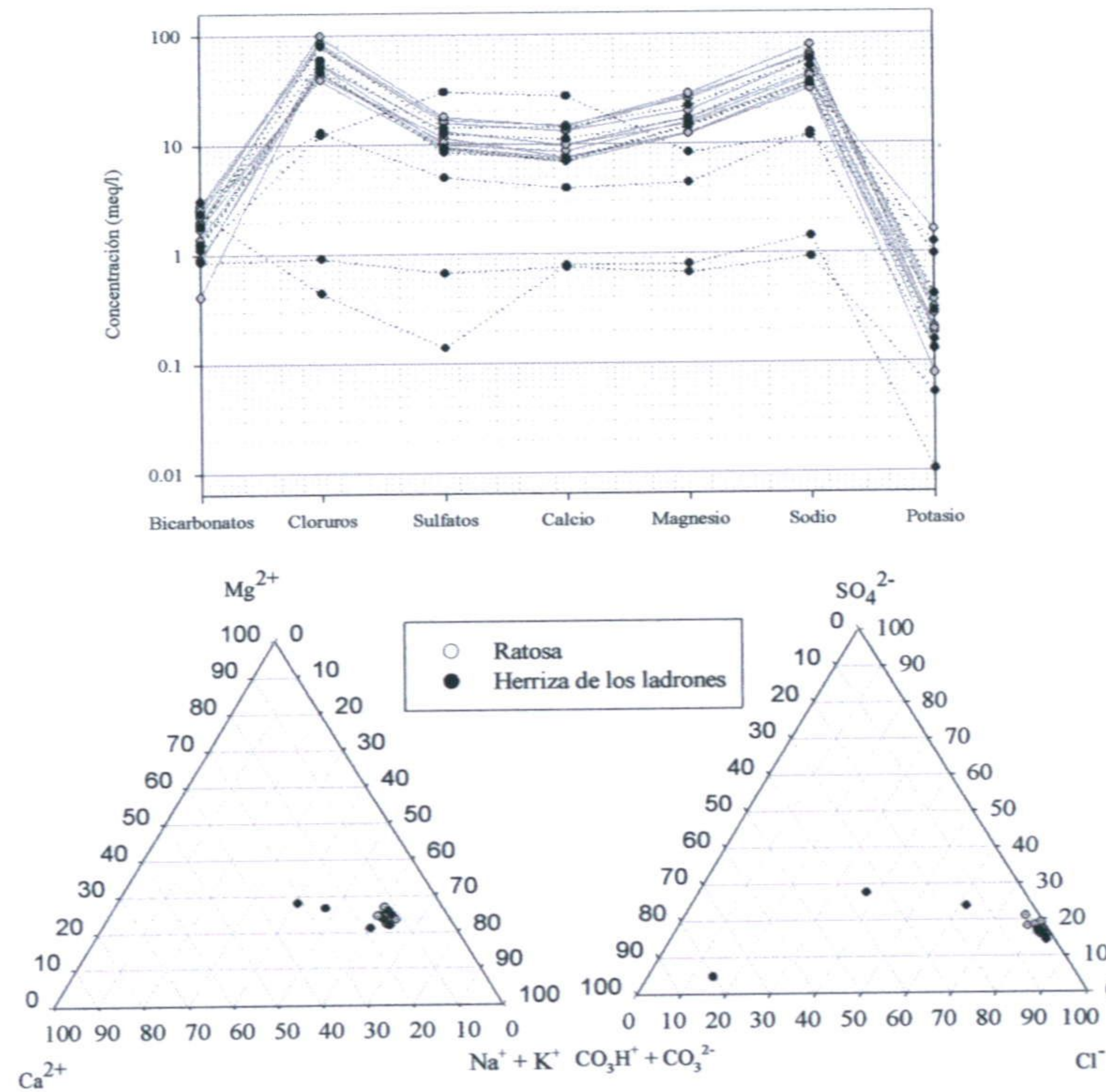


Figura 4.21. Representación de la composición iónica en las aguas de la laguna de la Ratoso y Herriza de los ladrones

Del mismo modo que en Noviembre de 1997 se puso de manifiesto una importante variación en la salinidad de la Herriza de los Ladrones, tras la mezcla de las aguas de esta laguna con las de la laguna de la Ratoso, esa variación lleva aparejado asimismo un cambio en la facies hidroquímica, bicarbonatada o mixta antes de la mezcla, y clorurada-sulfatada tras la mezcla. En la figura 4.21. se aprecia claramente este cambio; en el último muestreo representado (mayo de 1998), esta laguna tiene una facies hidroquímica idéntica a la de la Ratoso: Cl-(SO₄)/Na-(Mg)-(Ca).

4.3.2.3. Reserva Natural lagunas de Campillos

El agua de las lagunas de Campillos puede clasificarse como clorurada-sulfatada/sódico-cálcica, salvo en el caso de la laguna Dulce y la laguna de Camuñas, en las que el agua es sulfatada-clorurada/cálcica (tabla 4.4.).

El agua de la laguna Dulce (figura 4.22.) presenta una composición iónica relativamente constante durante el periodo considerado. Si bien acabamos de señalar

que la facies es sulfatada-clorurada/cálcica, en realidad las proporciones iónicas se encuentran en torno al 50%, tanto en el caso de los cationes Ca^{2+} y Na^+ como en el de los aniones SO_4^{2-} y Cl^- (aunque con un ligero predominio del primero). En los muestreos de diciembre de 1997 y febrero de 1998 los bicarbonatos aparecen en una concentración entre el 5 y el 25%, lo que sugiere la existencia de un aporte de agua de escorrentía superficial en la fase de llenado de la cubeta.

La facies hidroquímica en los piezómetros Dulce NW y Dulce SE es diferente. En el primer caso se trata de aguas mixtas, de baja salinidad (como se comentaba en el apartado correspondiente) y en el segundo caso de aguas clorurado sódicas, con salinidad alta.

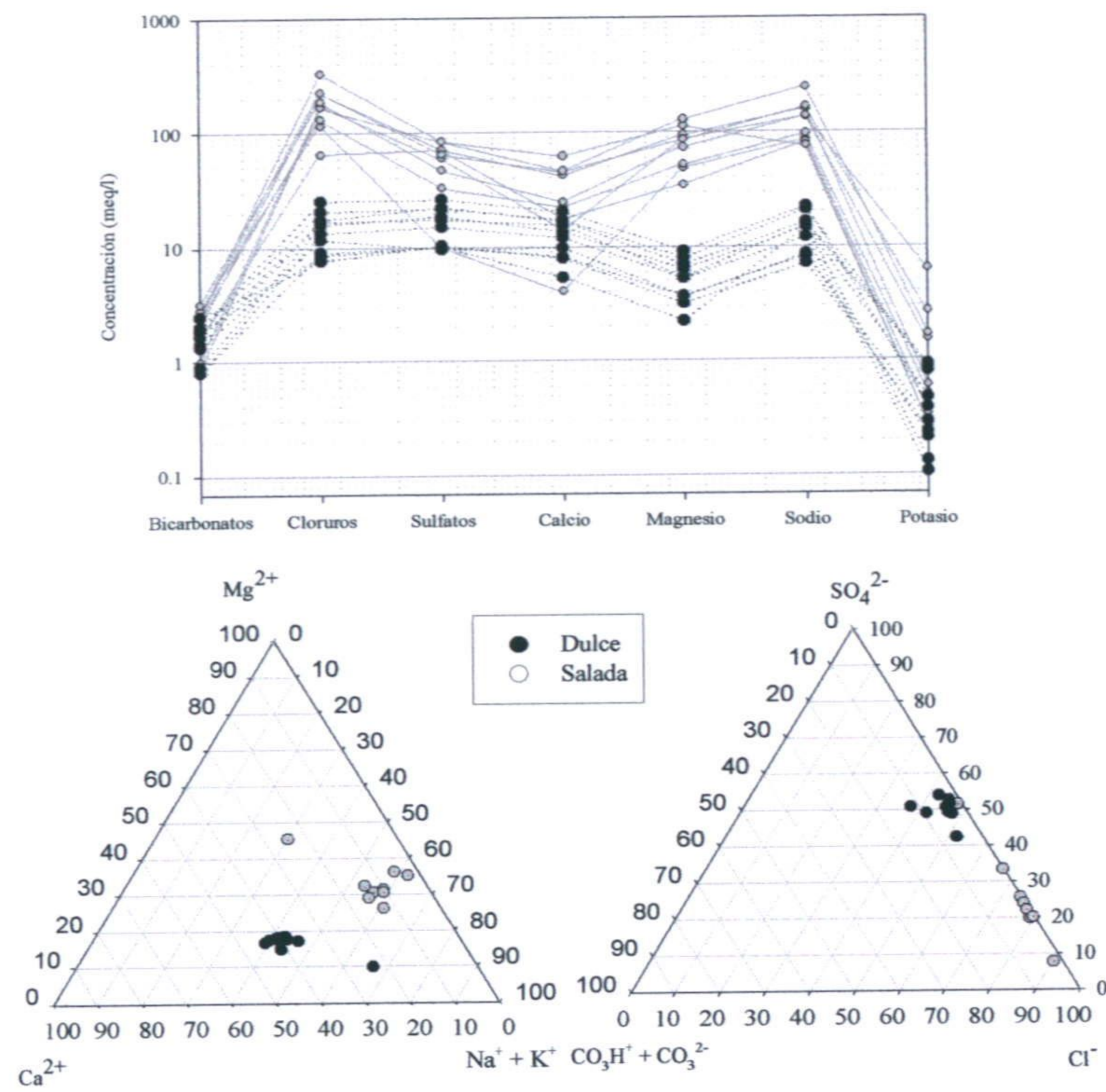


Figura 4.22. Representación de la composición iónica en las aguas de las lagunas Dulce y Salada

El agua de la laguna de Lobón (figura 4.23.) presenta una facies $\text{Cl}-(\text{HCO}_3)-(\text{SO}_4)/\text{Na}-(\text{Mg})-(\text{Ca})$. Aunque en la tabla 4.4. están clasificadas como $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3/\text{Na}$, en realidad hay un ligero predominio de bicarbonatos frente a sulfatos, al

menos en los muestreos representados (salvo en el último, mayo de 1998, en el cual los sulfatos superan a los bicarbonatos, quizá debido al proceso de concentración por evaporación). No se ha incluido dentro de una nueva categoría ($Cl > HCO_3 > SO_4/Na$) ya que, realmente, tanto bicarbonatos como sulfatos se encuentran en una proporción muy baja en comparación con los cloruros (en la laguna de Lobón y en el resto de las lagunas incluidas en esta categoría) y quizá indujera a confusión establecer esta nueva categoría.

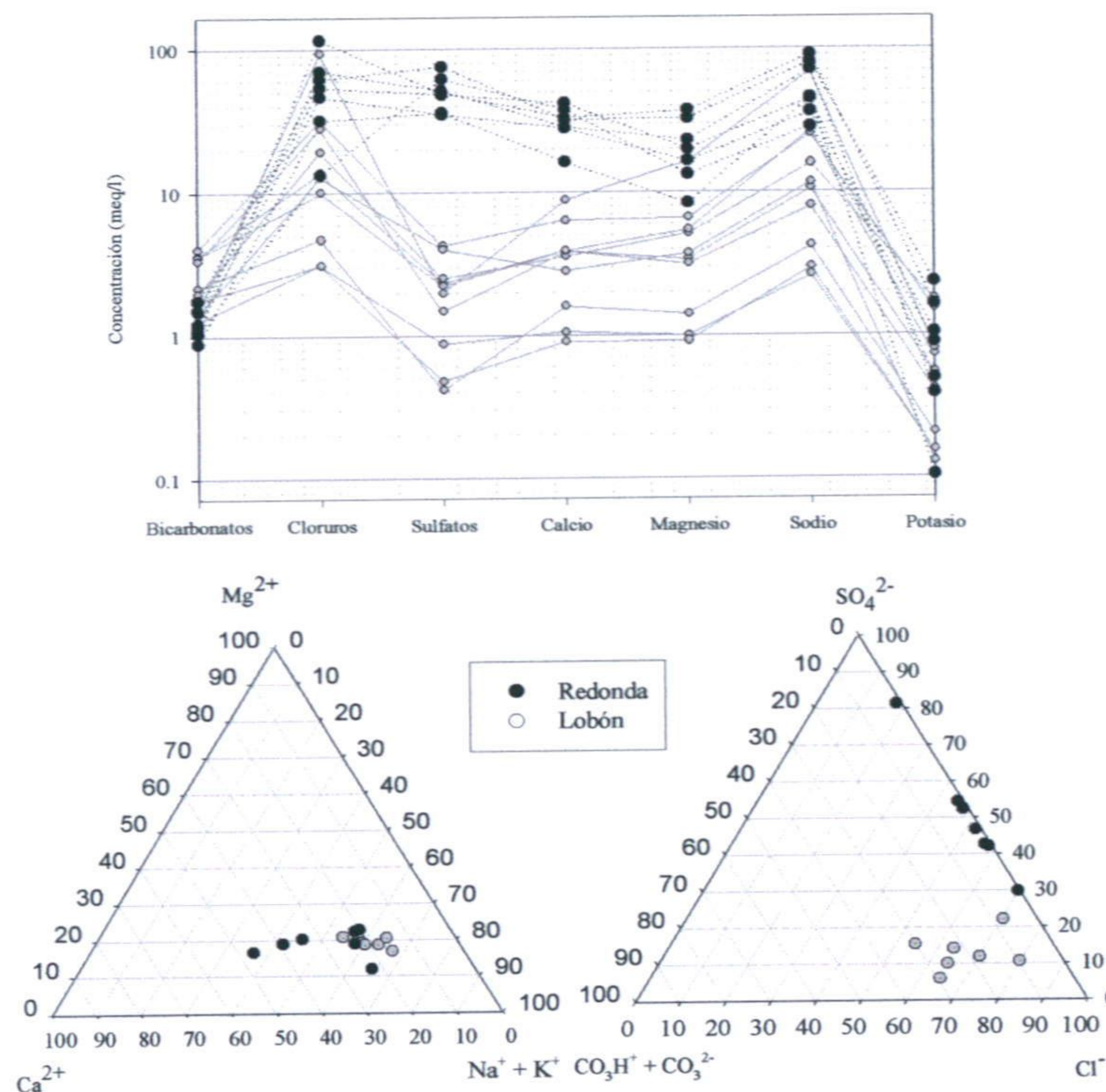


Figura 4.23. Representación de la composición iónica en las aguas de las lagunas Redonda y Lobón

El agua de la laguna Salada (figura 4.22.) presenta una facies hidroquímica $Cl-(SO_4)/Na-Mg-(Ca)$, como corresponde a una laguna hipersalina. La variación anual no es muy significativa; tan sólo en julio de 1997 se registró un mayor contenido de sulfato que de cloruro (51% frente al 49%).

La facies hidroquímica del agua de la laguna Redonda (figura 4.23.) es $Cl-SO_4/Na-Ca-(Mg)$ con contenidos muy similares en cloruros y sulfatos. Por otra parte, la

facies hidroquímica de esta laguna es prácticamente idéntica a la de la laguna Salada, si bien la primera tiene mayores contenidos en sulfato y calcio.

En la figura 4.22. se representan los datos hidroquímicos del agua de dos lagunas relativamente grandes, la Dulce y la Salada, sulfatada y clorurada respectivamente, y con escasa dispersión hidroquímica entre los distintos muestreos. En la figura 4.23. se representan los resultados del análisis del agua de dos lagunas: Lobón (cerca de la laguna Dulce) y Redonda (cerca de la laguna Salada) que son pequeñas, y cuyas facies hidroquímicas son cloruradas. Las diferencias con las anteriores son, en primer lugar,

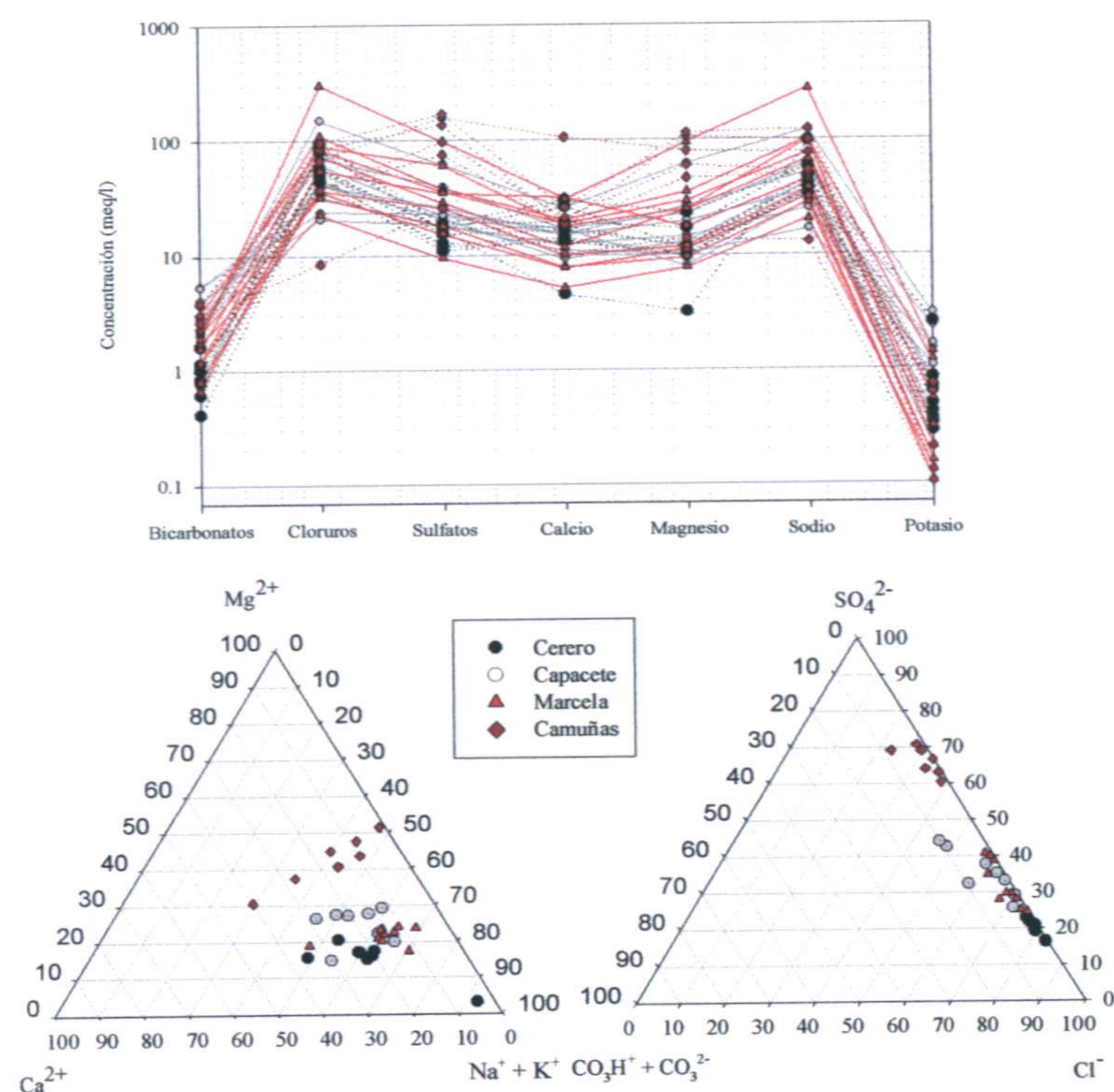


Figura 4.24. Representación de la composición iónica en las aguas de las lagunas Cerero, Capacete, Marcela y Camuñas

una mayor dispersión de los resultados y, en segundo lugar, una menor concentración salina total.

El agua de la laguna de Capacete (figura 4.24.) presenta una facies del tipo Cl-SO₄/Na-(Ca)-(Mg). La dispersión que se observa en los análisis representados no es importante y la proporción entre cloruros y sulfatos es aproximadamente de 60/40 %, respectivamente. En los dos primeros análisis aparecen bicarbonatos en una

concentración mayor del 5% y en los posteriores análisis, al mismo tiempo que se registran mayores concentraciones salinas, los contenidos en dicho anión son siempre inferiores a dicha cifra.

De todas las lagunas de Campillos, es en la laguna de Cerero (figura 4.24.) en la que el agua presenta una mayor proporción de cloruros frente a sulfatos, aproximadamente 80/20 %, respectivamente (la proporción es incluso mayor que en la laguna Salada: 70/30 %). La facies hidroquímica es Cl/Na-(Ca)-(Mg).

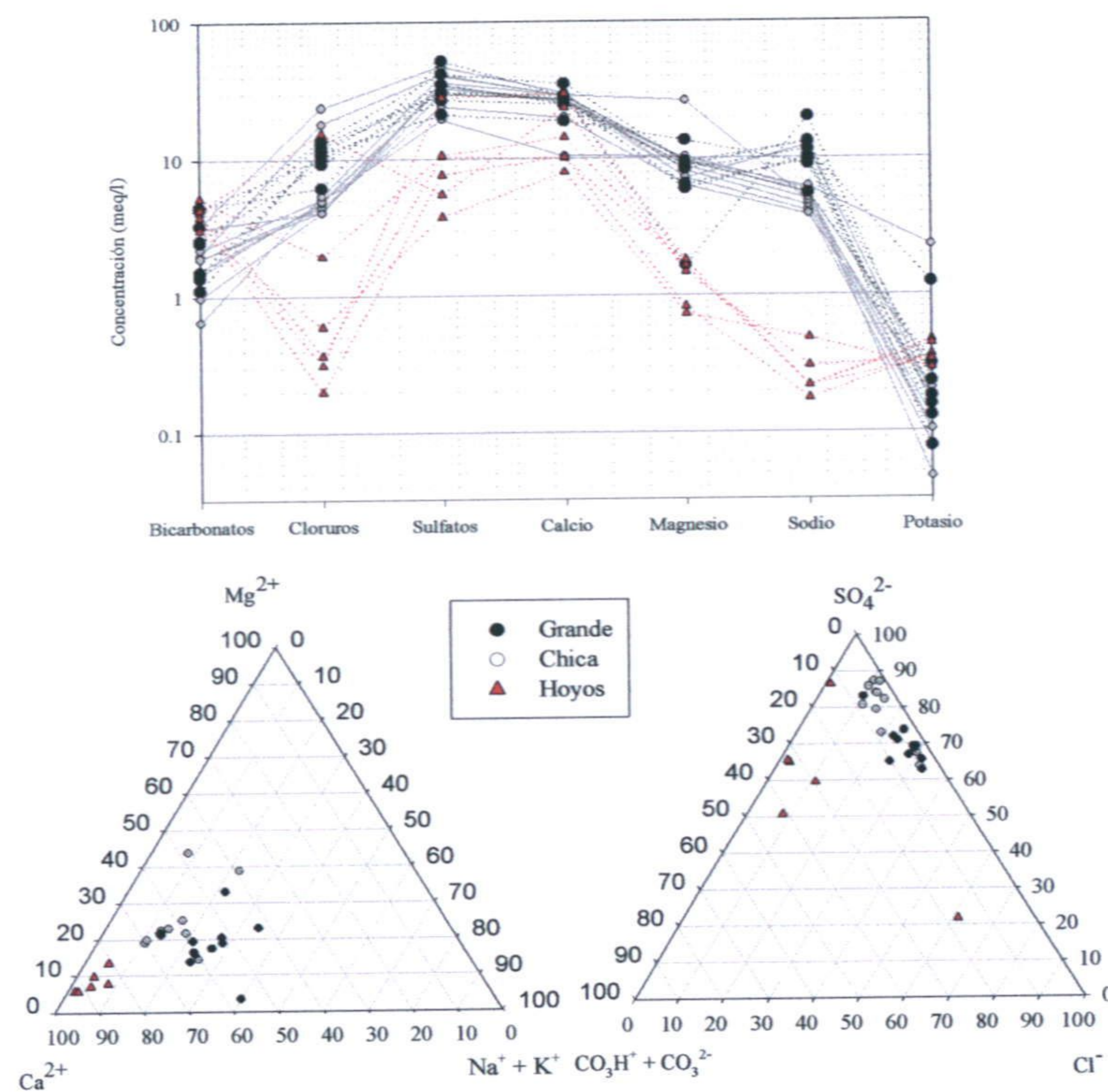


Figura 4.25. Representación de la composición iónica en las aguas de las lagunas Grande, Chica y la dolina Hoyos

La laguna de Camuñas (figura 4.24.) es la única laguna de Campillos en la cual, durante el periodo considerado, el contenido en ion sulfato supera en todos los muestreos al ion cloruro (en la tabla 4.5. la facies hidroquímica de las lagunas Dulce y Camuñas se clasifica como SO₄>Cl>HCO₃/Na pero, según habíamos señalado, la primera es en realidad de facies aniónica mixta entre sulfatada y clorurada). El agua de la laguna de Camuñas se clasifica como sulfatada-clorurada/mixta: SO₄-Cl/Na-Mg-(Ca).

El agua de la laguna Marcela (figura 4.24.) presentó en todos los muestreos una facies $\text{Cl-SO}_4/\text{Na-(Mg)-(Ca)}$, salvo en el de mayo de 1998, en el que se registró un aumento apreciable del contenido en ion Ca^{2+} frente al resto (tabla 4.5.).

Aunque en un área de dimensiones reducidas, estas lagunas se han formado sobre sustratos diferentes, que condicionan tanto la composición de las aguas de escorrentía superficial como la de las aguas subterráneas de los acuíferos locales existentes en la zona, ya que las lagunas representan los puntos de descarga de estos acuíferos o acuitardos.

4.3.2.4. Reserva Natural lagunas de Archidona

Estas lagunas, situadas sobre el sector kárstico de "Los Hoyos", son los humedales continentales de la provincia de Málaga que reciben las aportaciones relativamente más importantes de agua subterránea, como se comentó anteriormente. Como consecuencia de ello, al ser los puntos de descarga de estos acuíferos kársticos en evaporitas, la composición iónica de sus aguas debe reflejar los efectos de la disolución de esas evaporitas (yeso y anhidrita, fundamentalmente) que son muy abundantes en este sector.

El agua de la laguna Grande de Archidona presenta una facies hidroquímica $\text{SO}_4\text{-(Cl)/Ca-(Mg)-(Na)}$ (figura 4.25.). El contenido en ion Cl^- es menor del 25% en la mayor parte de los casos y la variabilidad en la composición iónica no es muy elevada.

El agua de la laguna Chica de Archidona presenta una facies con una composición iónica parecida a la de la laguna Grande: $\text{SO}_4\text{-(Cl)/Ca-(Na)-(Mg)}$, y es algo más salina que ésta.

El agua de la dolina Hoyos presenta una facies sulfatada-bicarbonatada/cálcica. En este sentido, las aguas del sumidero de la dolina deben ser muy semejantes a las aguas subterráneas en esta zona. Las diferencias respecto a este patrón hidroquímico en las aguas de la laguna Grande y Chica serían consecuencia de los ciclos de evaporación que sufren estas lagunas, por ser el clima de la región semiárido y tener un déficit hídrico tan acusado.

4.3.2.5. Lagunas de Antequera

El agua de estas dos lagunas es dulce, como se expuso en el apartado anterior, y su facies hidroquímica presentan ciertas peculiaridades. El agua de la laguna de Caja (figura 4.26.) tiene en todos los casos una facies $\text{SO}_4\text{-HCO}_3/\text{Ca-(Mg)}$, con una composición iónica en la que los contenidos en sulfato y bicarbonato son próximos al 50%, aunque con ligero predominio del primero. En dos de las muestras (octubre de 1997 y mayo de 1998) el contenido en cloruros supera el 5% (tabla 4.4.).

El agua de la laguna de Viso (misma figura que la anterior) contiene un mayor contenido en bicarbonato que la laguna de Caja. La facies hidroquímica es $\text{HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)/Ca-(Mg)-(Na)}$, lo que constituye un caso único entre las lagunas que se incluyen en este estudio (tabla 4.4.).

Las facies hidroquímicas y las concentraciones iónicas de las aguas de estas lagunas, situadas en las cercanías del puerto de Las Pedrizas, a 720 m de altitud, tienen un régimen hidrológico claramente epigénico y, aunque se hayan formado por procesos de disolución kárstica, su alimentación subterránea no debe ser muy significativa, ya que sus aguas están poco mineralizadas y los acuíferos de la zona (ligados a materiales triásicos) poseen aguas con un contenido salino algo mayor.

4.3.2.6. Paraje Natural de la desembocadura del Guadalhorce

Las dos lagunas que se han muestreado poseen aguas cloruradas/sódicas de influencia marina, aunque existen entre ellas algunas diferencias.

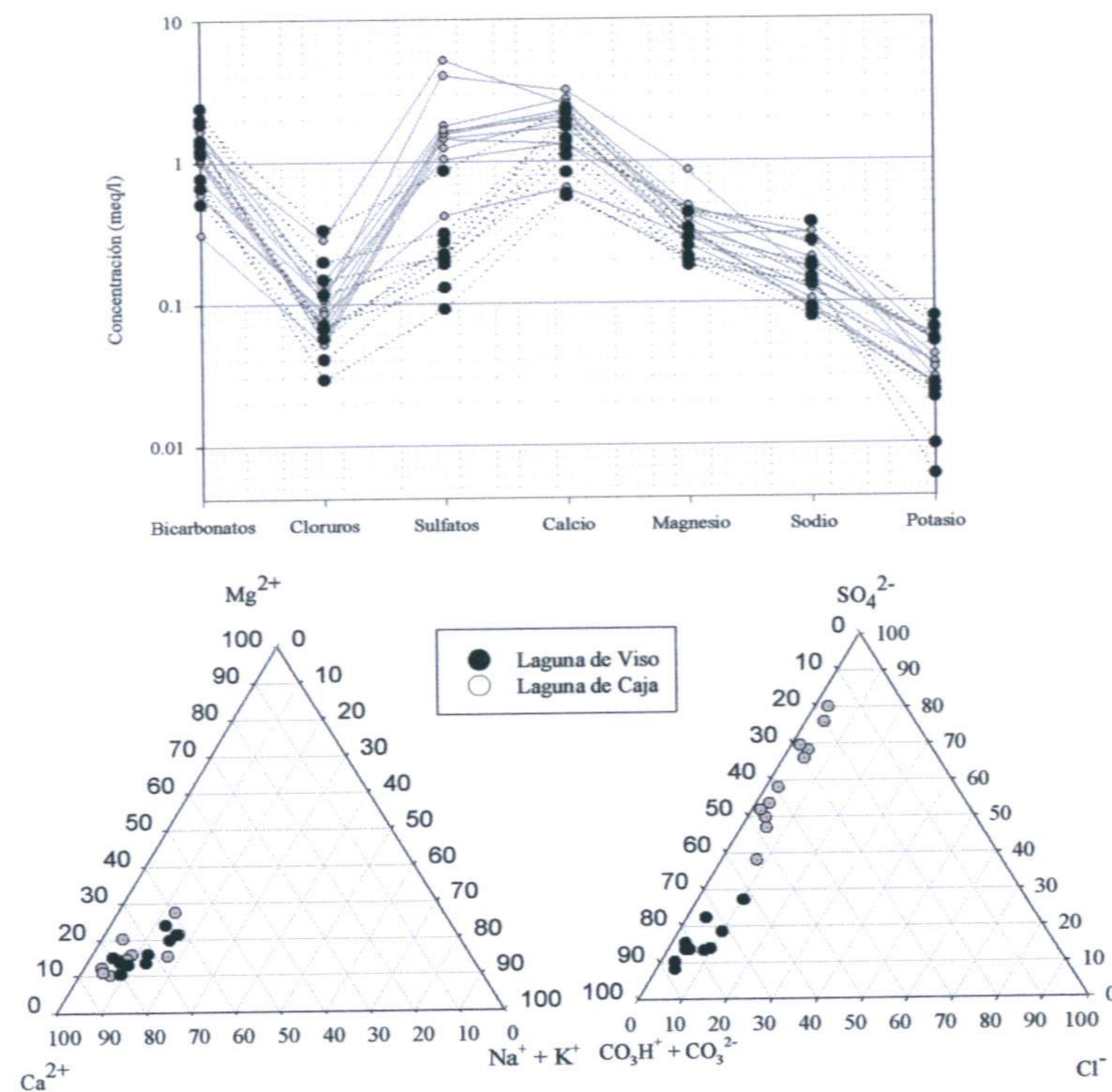


Figura 4.26. Representación de la composición iónica en las aguas de las lagunas Caja y Viso

En el agua de la laguna Guadalhorce Mayor, la facies hidroquímica es Cl-(SO₄)/Na-(Mg)-(Ca) (figura 4.27.). Se trata de facies características de zonas

húmedas con influencia marina. Estas lagunas se han formado en épocas recientes y su evolución y características pueden ser comparables a las de las Albuferas de Adra.

El agua de la laguna Guadalhorce Eucaliptal es algo menos salina que la anterior y presenta un mayor porcentaje de bicarbonatos y (proporcionalmente) de magnesio y potasio, lo que indica un mayor aporte de aguas continentales. Su facies hidroquímica es Cl-(SO₄)-(HCO₃)/Na-(Mg)-(Ca).

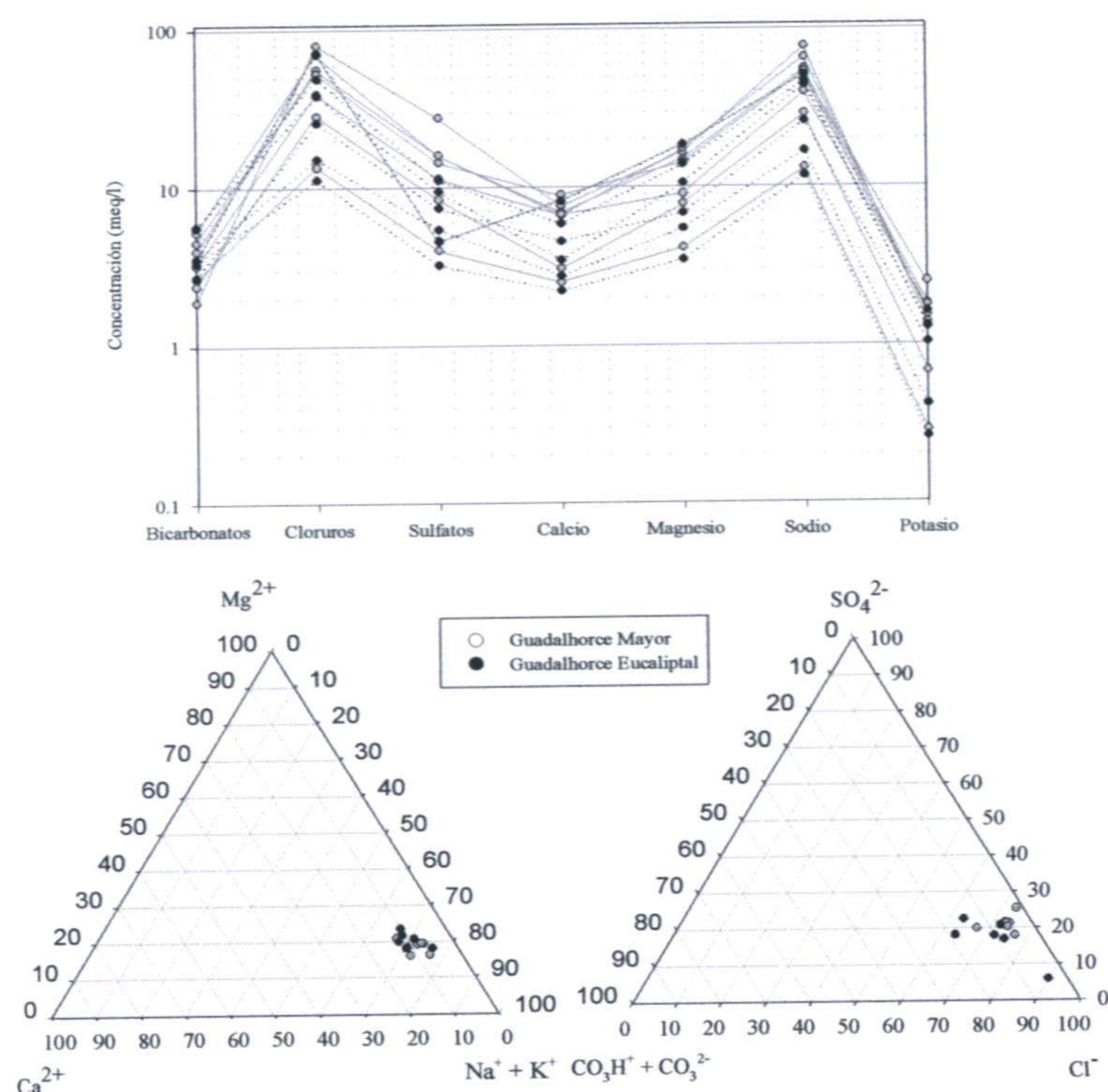


Figura 4.27. Representación de la composición iónica en las aguas de las lagunas Mayor y Eucaliptal

4.3.2.7. Reserva Natural Albuferas de Adra

En la figura 4.28. se observan las facies hidroquímicas del agua de las albuferas de Adra. La diferencia fundamental con la desembocadura del Guadalhorce estriba en que, en Adra, el agua de las dos albuferas contienen una mayor cantidad de sulfatos. El agua de la Albufera Nueva posee facies del tipo Cl-(SO₄)/Na-(Mg)-(Ca). En la Albufera Honda la facies es del tipo Cl-SO₄-(CO₃H)/Na-Mg-(Ca). La razón de que existan estas

diferencias estriba en que la albufera Honda está más alejada del mar que la Nueva, y además recibe entradas superficiales puntuales pero abundantes cuando hay circulación superficial en las ramblas de la Estanquera y de las Adelfas. Las aguas de las acequias presentan facies sulfatadas-cloruradas/sódicas-cálcicas, debido a que son aportadas por el río Adra, que atraviesa materiales yesíferos triásicos en ciertos sectores de su cuenca vertiente y recibe aguas subterráneas procedentes de las Fuentes de Marbella.

Las aguas de los piezómetros poseen una facies similar a la de la laguna Honda, si bien la salinidad aumenta, en general, con la cercanía al mar.

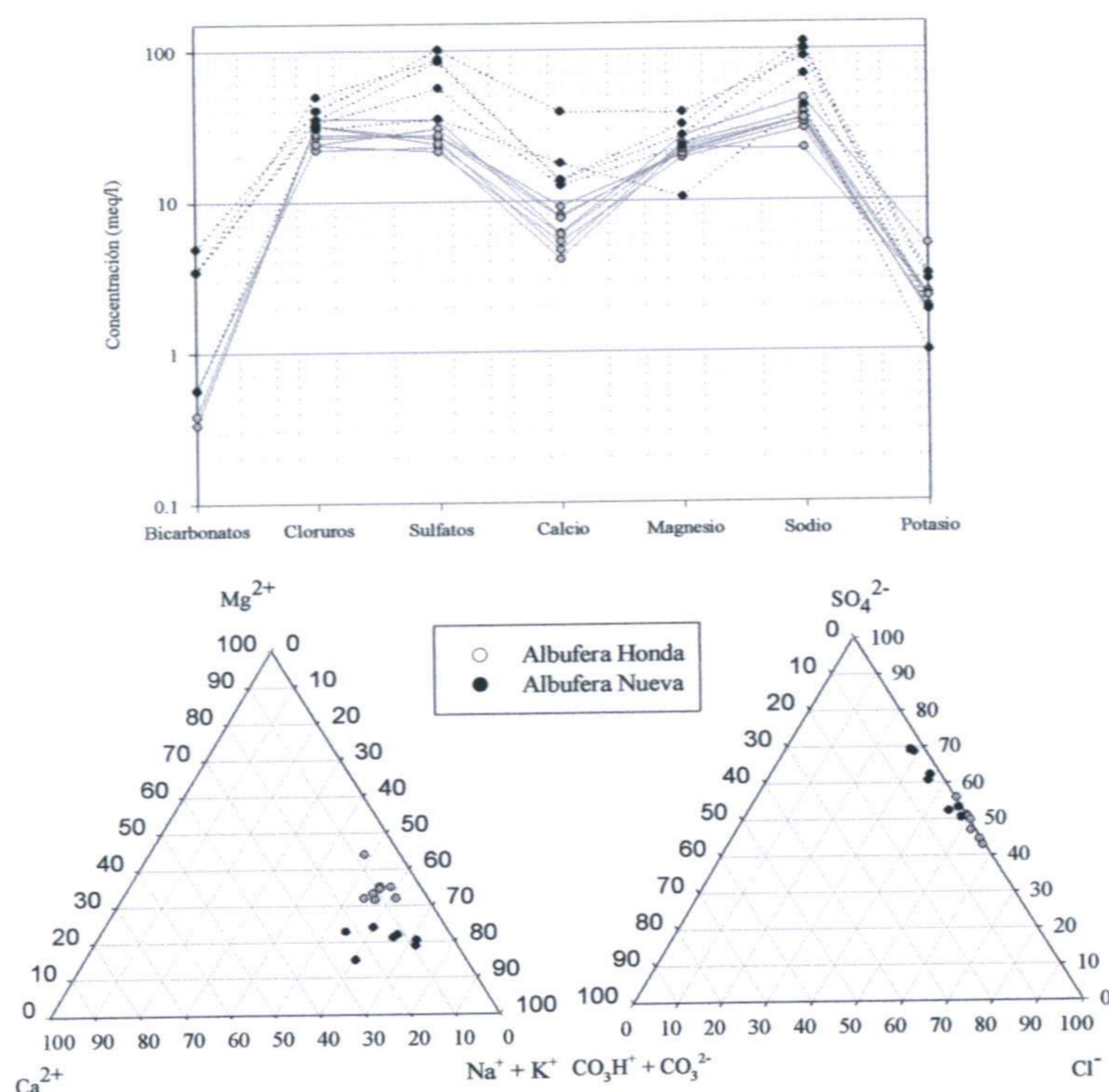


Figura 4.28. Representación de la composición iónica en las aguas de las lagunas Honda y Nueva

4.4. Evolución del pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y nutrientes

Se consideran compuestos o variables que están relacionados con actividades biológicas de tipo metabólico el pH, la alcalinidad, el oxígeno disuelto y la clorofila "a".

En las lagunas de la zona de estudio, el pH del agua no suele ser inferior a 8. Por lo general, está comprendido entre 8.3 y 9.4. Se trata, por tanto, de aguas básicas o muy básicas. El contenido en oxígeno disuelto suele mantenerse en torno a los 7 mg/l como valor medio, aunque la desviación típica en esta variable es mucho mayor que la obtenida para el pH, como se verá en el apartado de variaciones diarias.

El factor más importante que influye en las variaciones, tanto diarias como estacionales, de estos dos parámetros es la actividad fotosintética del fitoplancton. Cuando el fitoplancton realiza la fotosíntesis, consume dióxido de carbono y excreta oxígeno, como producto de desecho de su metabolismo, que se disuelve en el agua. Al ser consumido el dióxido de carbono, disminuye su concentración en el agua y así la concentración de hidrogeniones (H^+) disminuye para mantener el equilibrio:



El pH aumenta, pues, a consecuencia del proceso de la fotosíntesis.

4.4.1. Evolución del pH

En las lagunas de Antequera, el pH medio del agua medido durante el periodo de estudio fue de 8.8 en la laguna de Caja, y de 8.9 en la laguna de Viso. La evolución refleja claramente el proceso explicado anteriormente (figura 4.29.); en los meses de verano, el pH es más básico como consecuencia de la mayor tasa fotosintética: es en primavera cuando se producen los denominados “blooms” de fitoplancton, que terminan su ciclo vegetativo a finales de verano. En invierno, por el contrario, al haber menos actividad fotosintética en la columna de agua, la concentración de CO_2 es más alta, en comparación con el verano, y el pH es menor. Las tendencias en la evolución temporal del pH que se aprecian en el resto de las lagunas no parecen alejarse mucho de este patrón. Las lagunas con el agua más básica han sido Capacete y Cerero, con un pH algo superior a 9 como media, y la menos básica la de la laguna Grande de Archidona, con un pH medio de 8.5. El agua de las albuferas de Adra presenta asimismo un pH elevado, con un valor medio de 8.7, similar al establecido en estudios anteriores (El Amrani-Paaza, 1997). La evolución estacional muestra un patrón similar en las dos lagunas, con máximos en primavera y principios de verano, y mínimos en invierno.

4.4.2. Evolución de la alcalinidad

Las aguas con una mayor reserva alcalina son las más tamponadas, y existen lagos alcalinos en los que se alcanzan los 4.5 mM (expresada como la suma de los iones carbonato y bicarbonato). Esta alcalinidad suele ser debida al sodio (responsable del exceso de cationes) mientras que, en lagos con baja alcalinidad, ésta suele ser debida al calcio (Margalef, 1991). La evolución temporal de la alcalinidad es diferente según el complejo palustre de que se trate, aunque en general suele haber un aumento de la alcalinidad en los meses de invierno y una disminución en verano. Este comportamiento aparece en las lagunas de Antequera, las de Campillos (salvo Capacete), Guadalhorce y Fuente de Piedra, pero no ocurre en las lagunas de Archidona; en estas últimas lagunas parece haber un descenso en la alcalinidad desde abril de 1997 a agosto de 1998 (figura 4.30.).

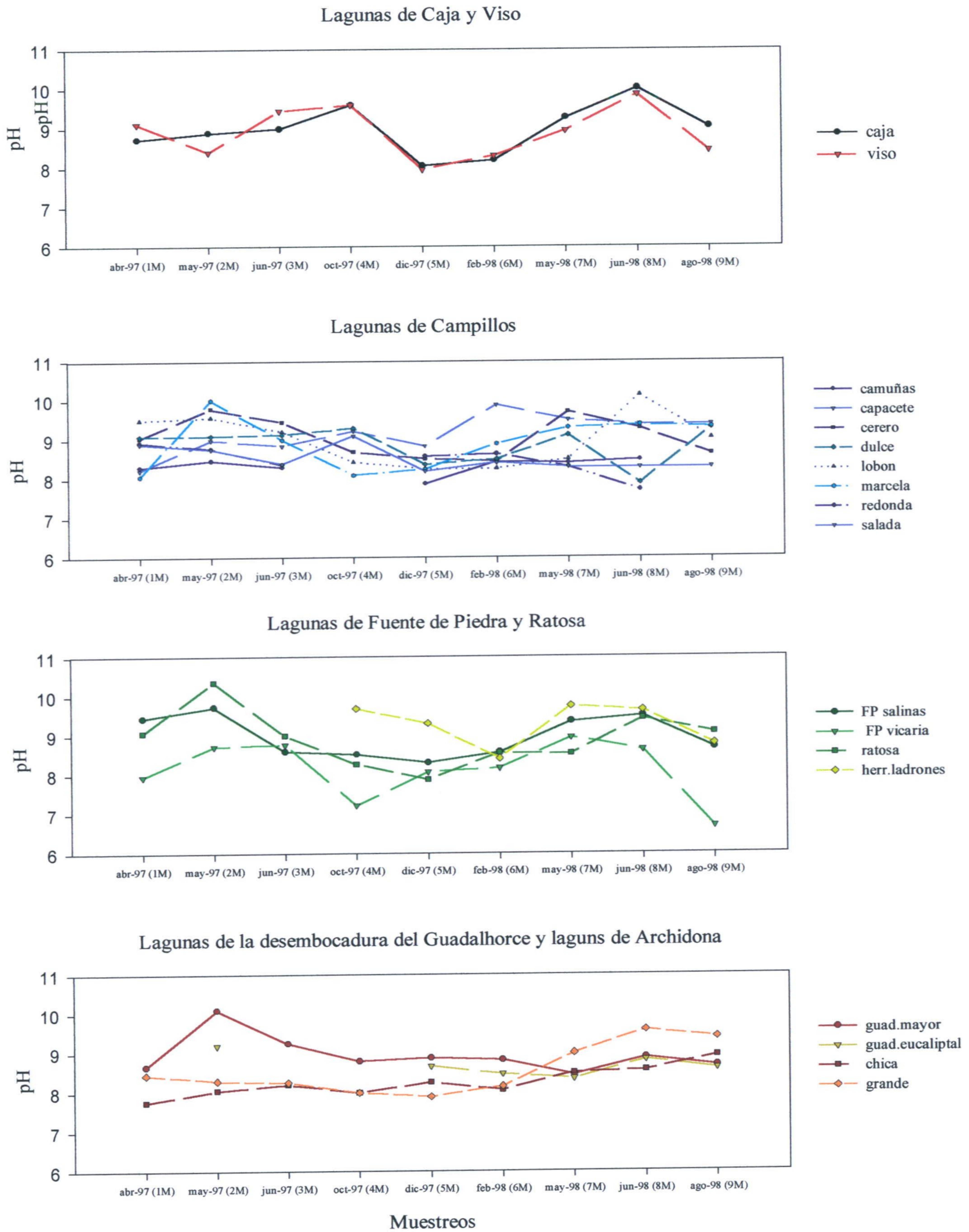


Figura 4.29 Evolución del pH en las lagunas estudiadas

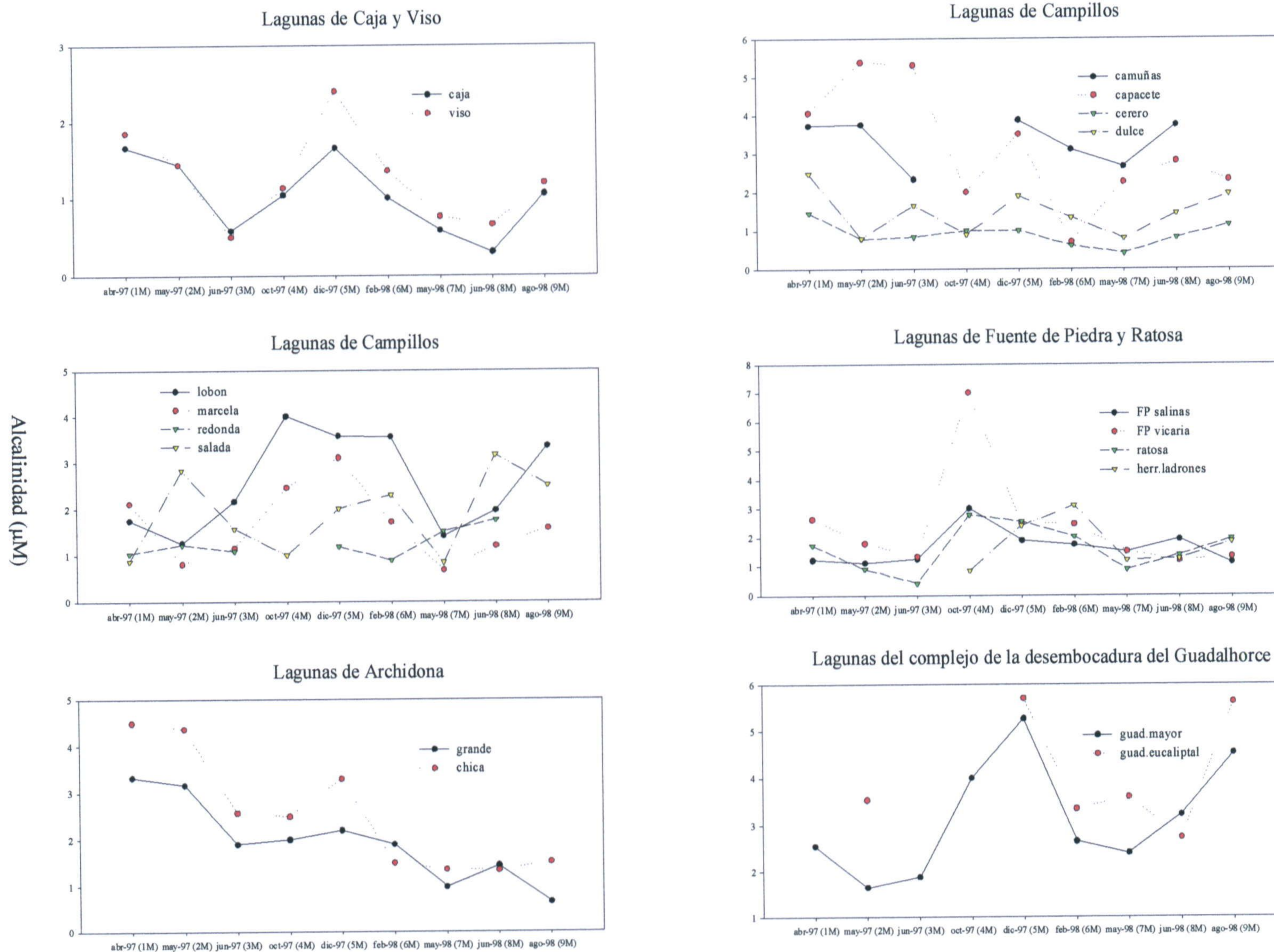


Figura 4.30. Evolución de la alcalinidad en las lagunas estudiadas

Los valores medios de alcalinidad han sido mayores en las lagunas de Capacete y Camuñas (3.1 mM) que en el resto. En la laguna de Lobón la alcalinidad media hallada ha sido de 2.5 mM, y en el resto de las lagunas de Campillos menor de 2 mM. Los valores más bajos obtenidos han sido los de Caja y Viso (1 mM), lo cual no es extraño ya que estas lagunas tienen un contenido iónico muy bajo en relación al resto de las lagunas. En las albuferas de Adra se registraron los valores máximos en los meses de invierno y primavera, y los mínimos en verano y otoño (figura 4.31.).

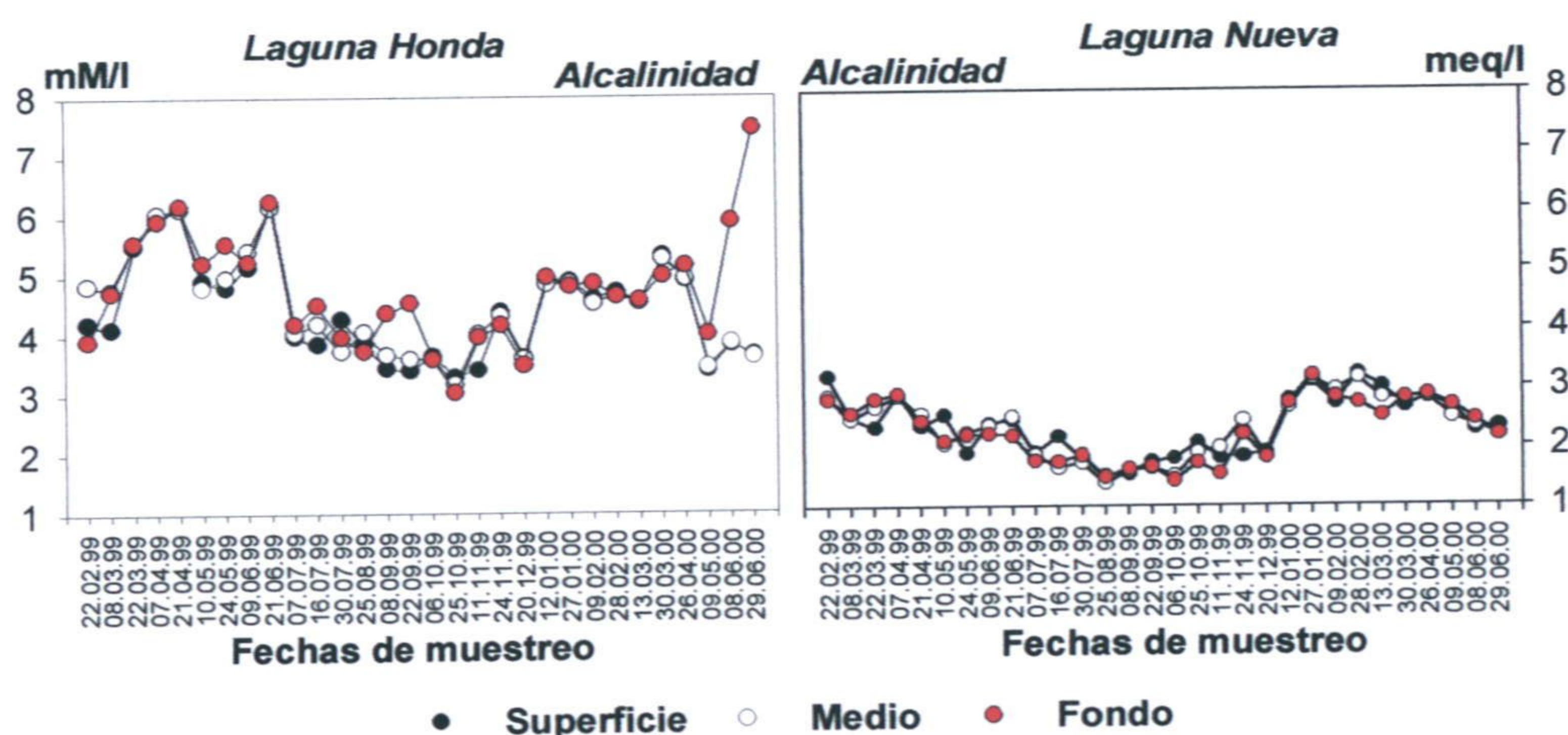


Figura 4.31. Evolución de la alcalinidad en las albuferas de Adra (modif. de Fabián, 2002)

4.4.3. Evolución del contenido en oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es esencial para los organismos aeróbicos, lo que hace que esta variable sea una de las más importantes en ecosistemas acuáticos. Se observa en general, un aumento de la concentración de oxígeno disuelto en todas las lagunas durante el periodo de estudio considerado durante los meses de invierno, debido probablemente, entre otras razones, a la mayor solubilidad en agua que tienen los gases, entre ellos el oxígeno, a menor temperatura del agua (figura 4.32.). Las concentraciones medias han sido mayores en las lagunas de Archidona (8.5 mg/l de media), y las menores concentraciones se han registrado en la laguna de Fuente de Piedra (5 mg/l), lo cual es coherente con el hecho de que el otro factor determinante en la solubilidad de este gas en agua es la salinidad: a mayor salinidad menor solubilidad del oxígeno. En algunas ocasiones se han registrado valores de oxígeno próximos a la saturación y, en otras, de sobresaturación. Este hecho debe ser debido tanto a procesos físicos de difusión de este gas desde la atmósfera como a la actividad fotosintética de las algas, proceso biológico que en estos sistemas es determinante en la dinámica de este gas en el agua.

En algunas lagunas en las que se realizaron perfiles de concentración de oxígeno se hallaron clinas bien definidas hasta llegar a situación de anoxia en el fondo. Esto ocurrió en la laguna Chica de Archidona, y en la laguna Honda durante los meses de verano (figura 4.33.).

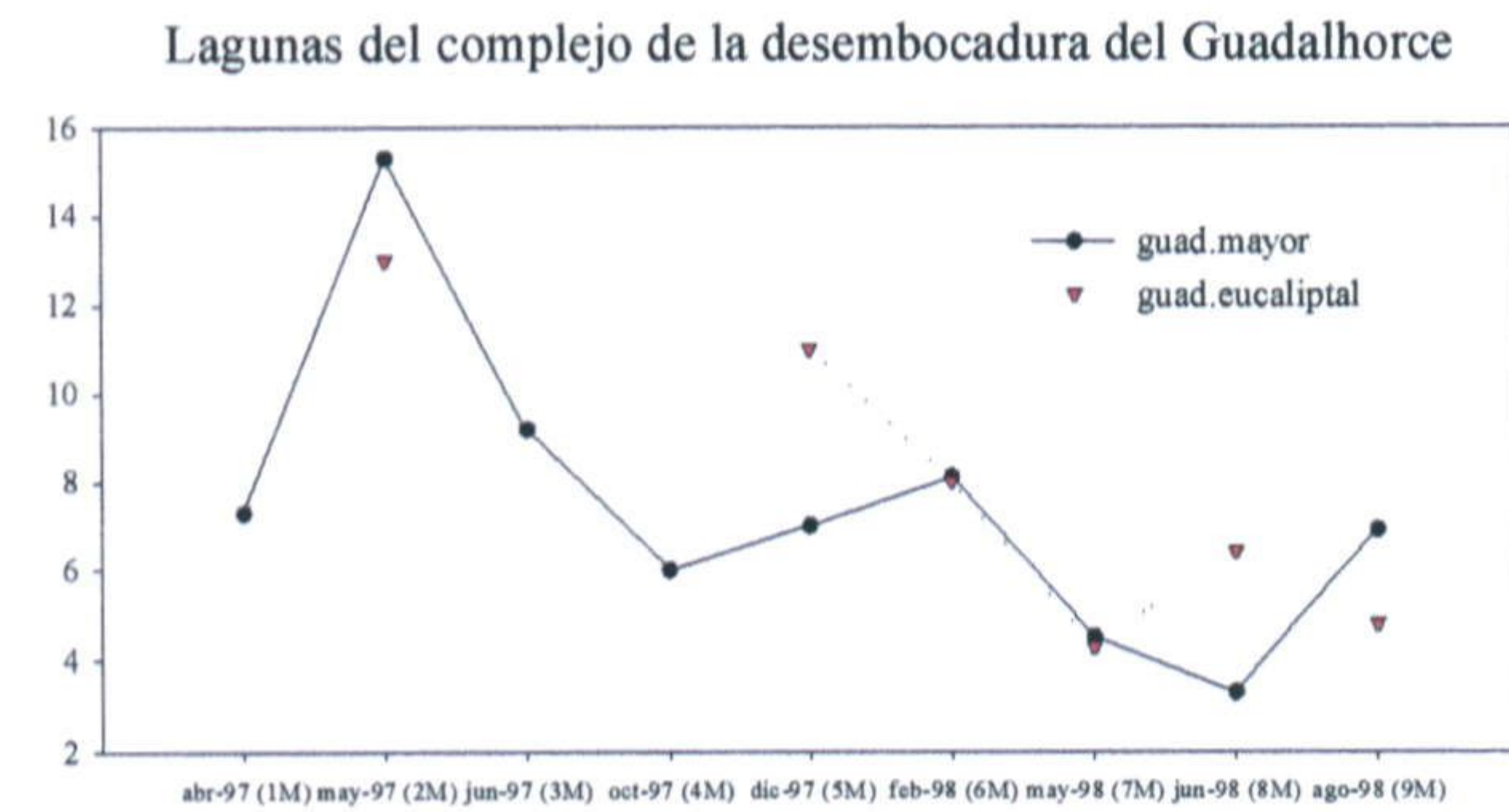
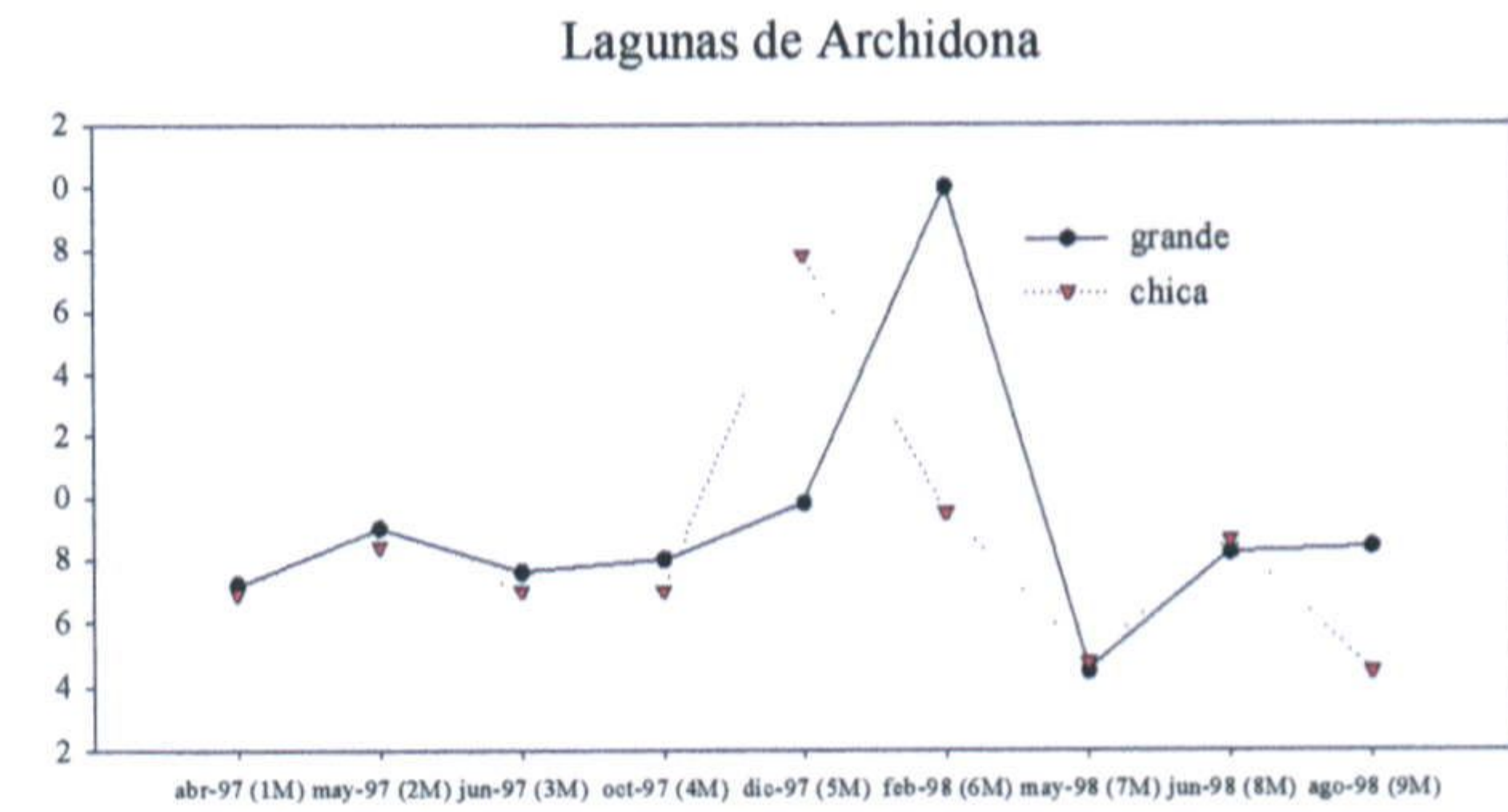
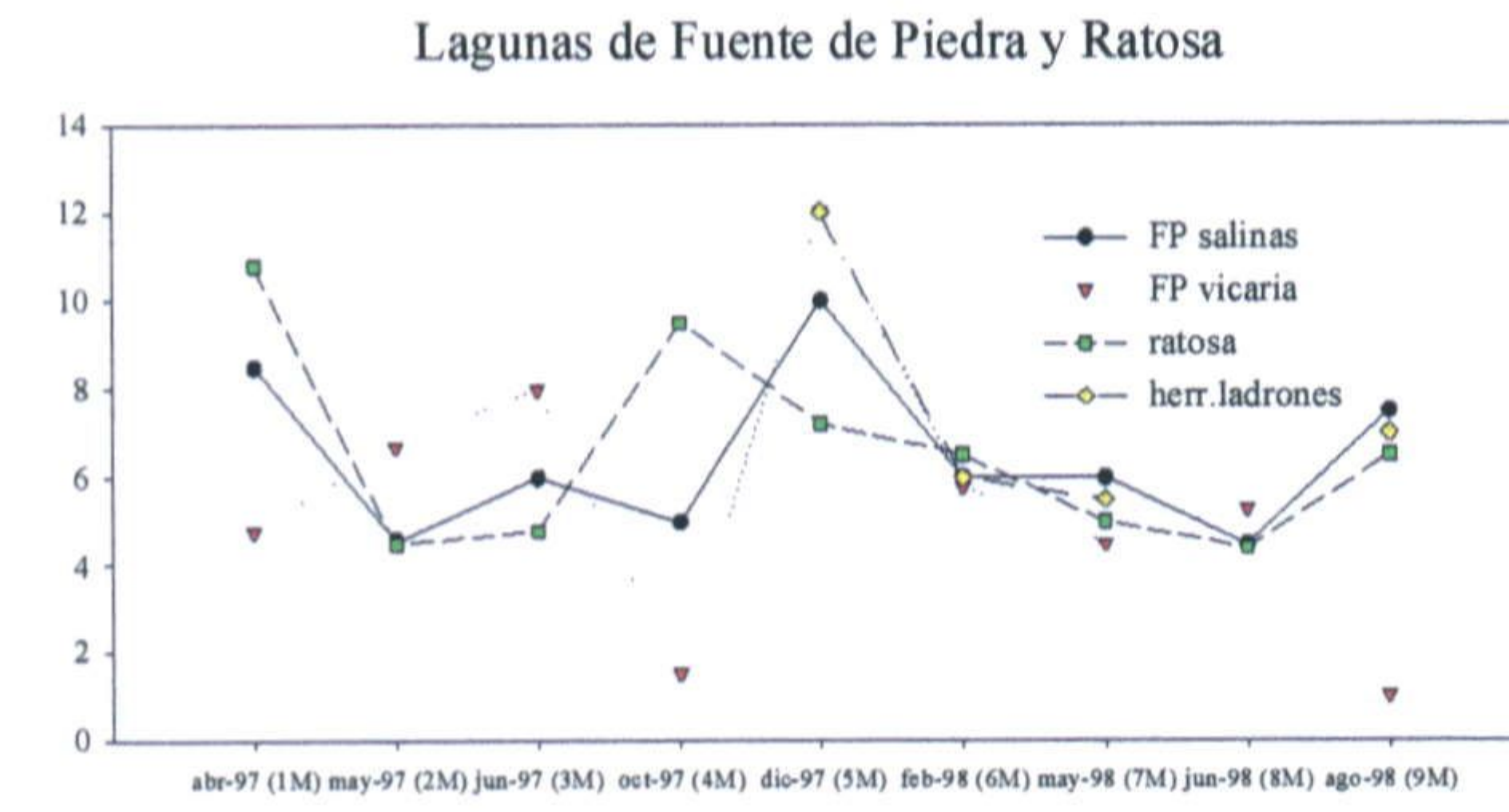
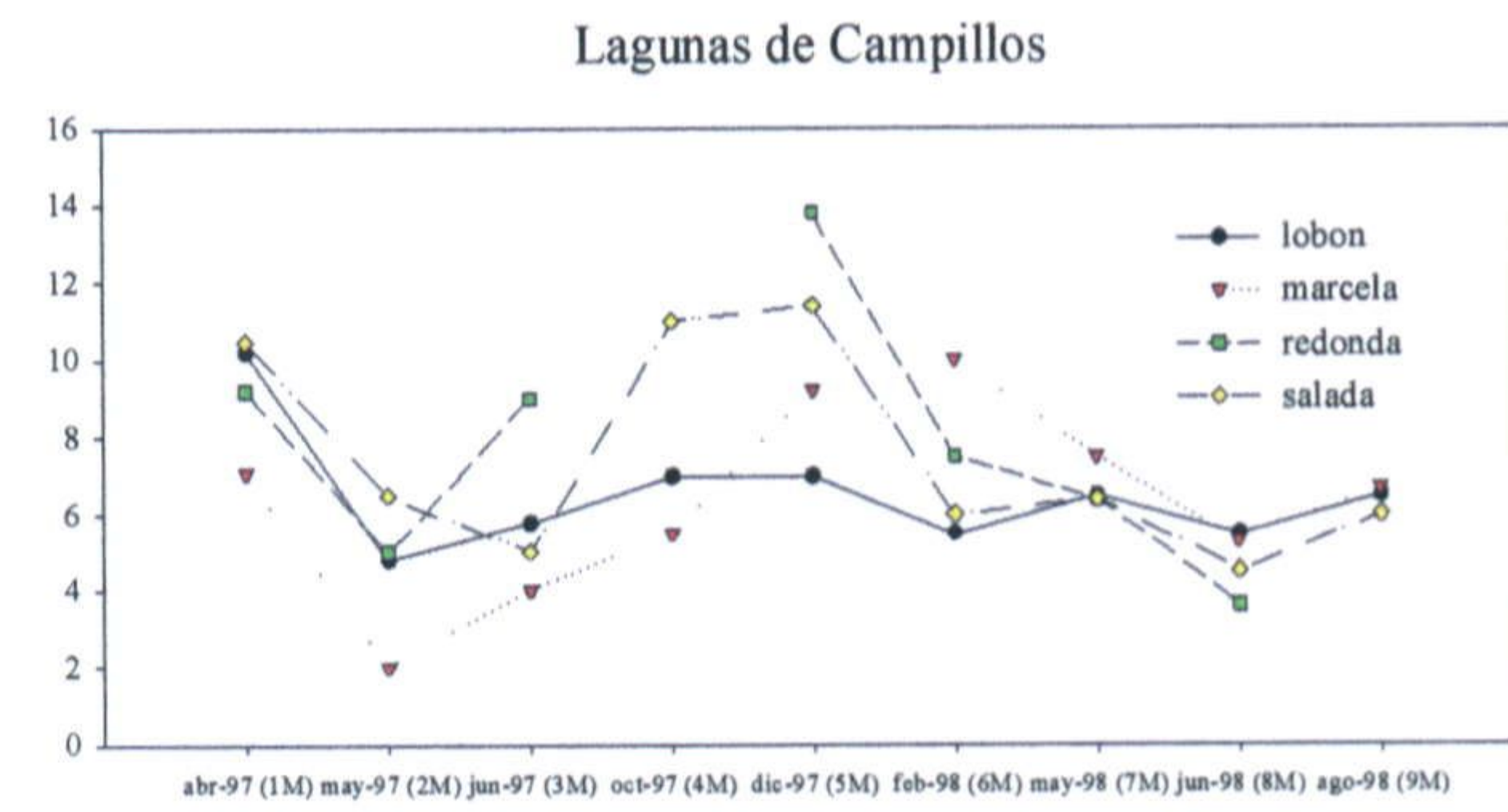
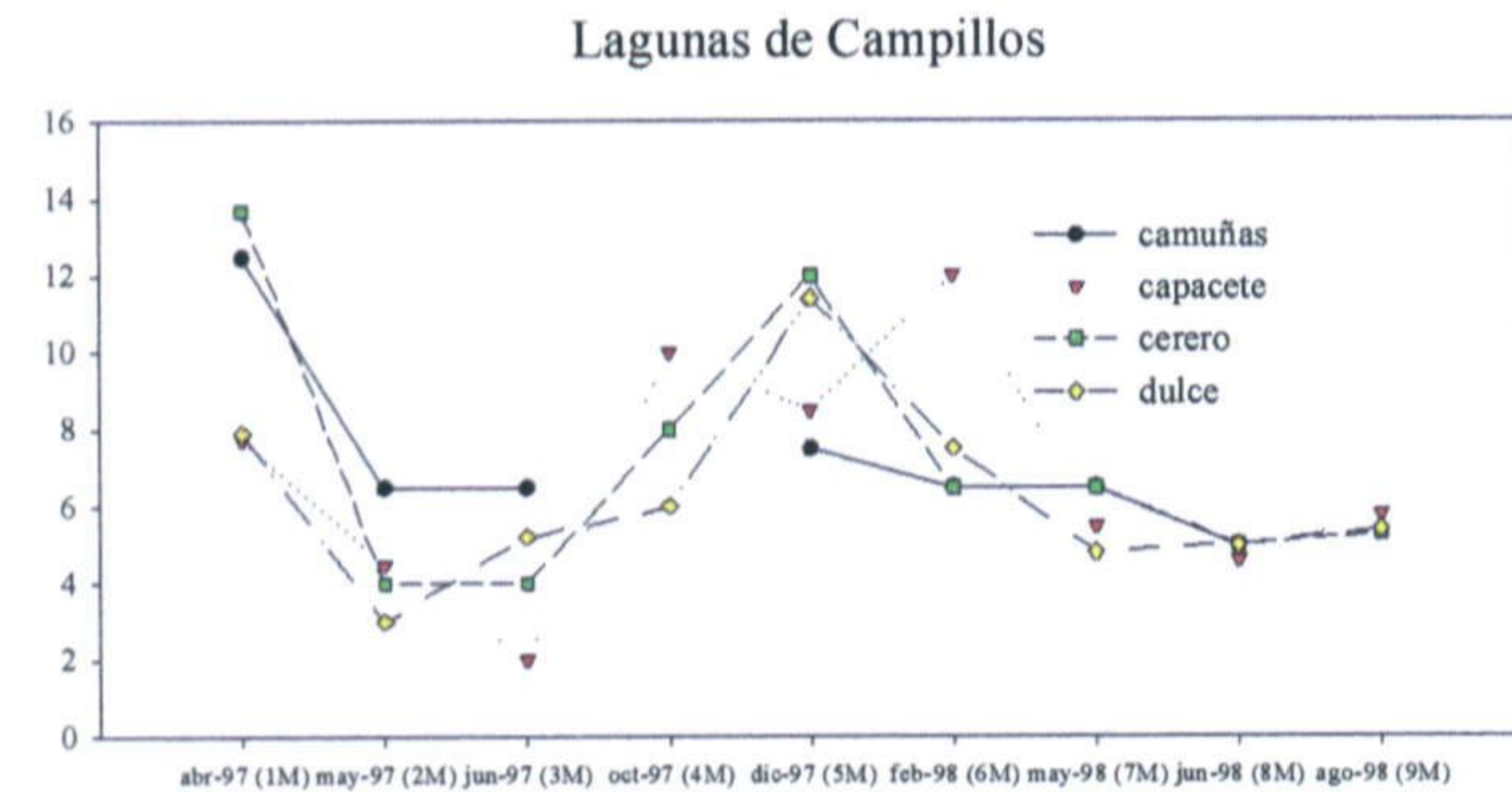
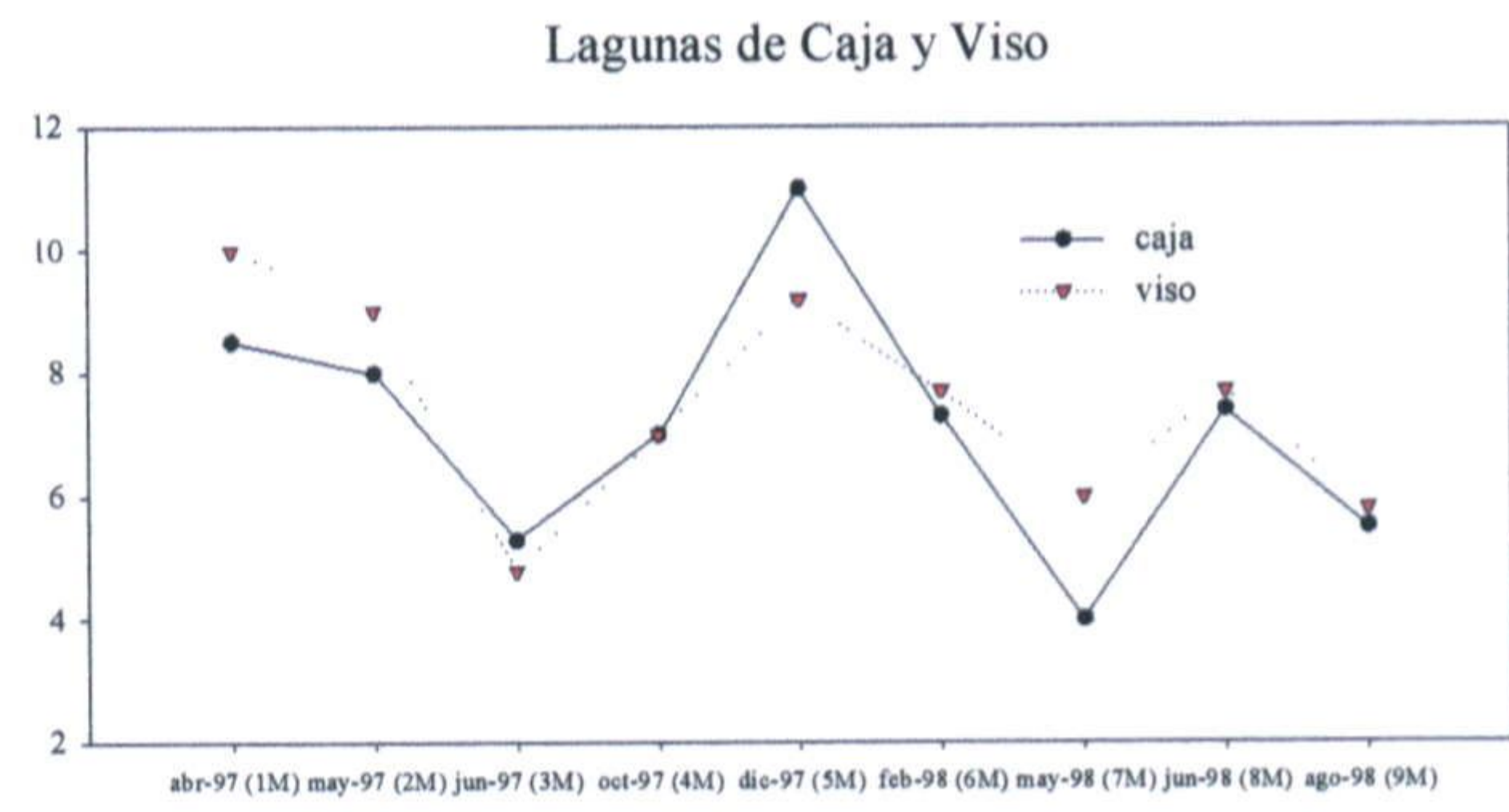


Figura 4.32. Evolución del oxígeno disuelto en las lagunas estudiadas

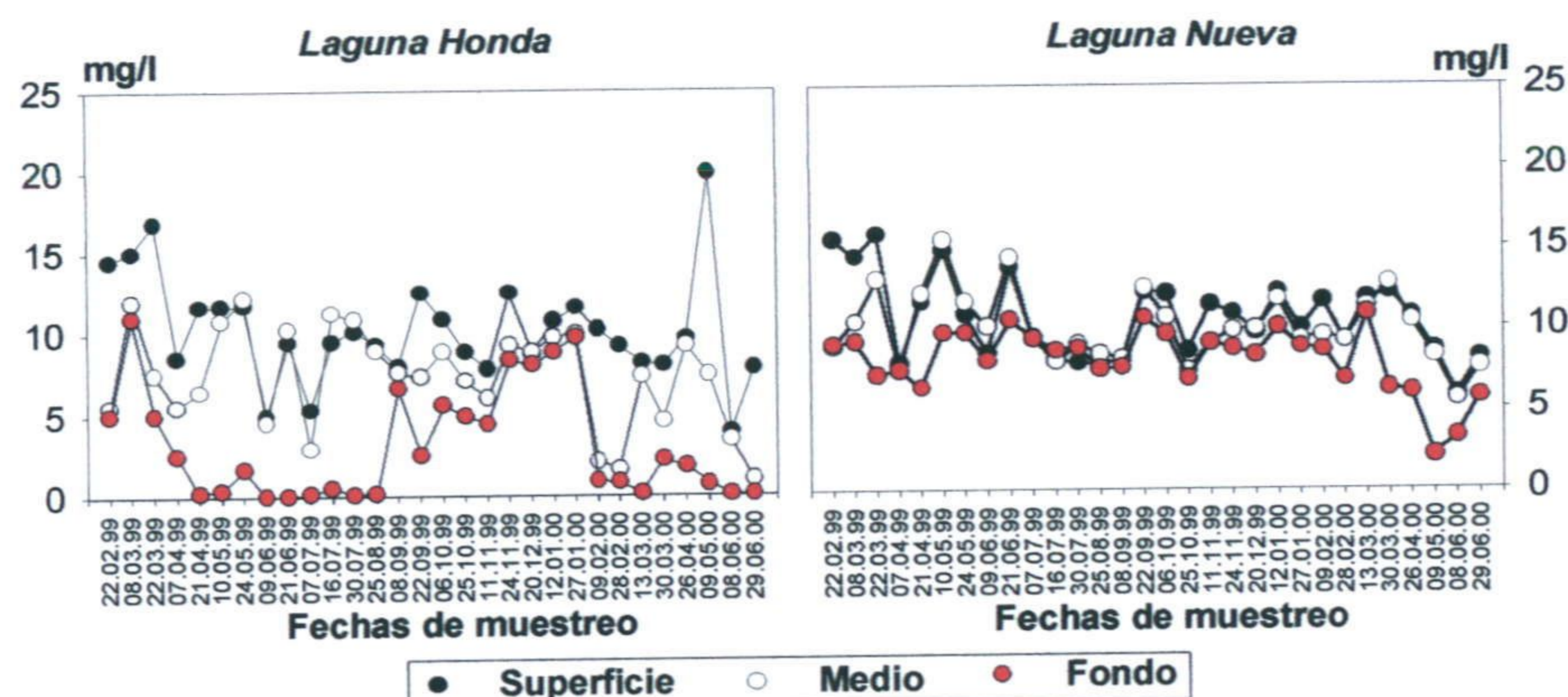


Figura 4.33. Evolución de la concentración de oxígeno disuelto en las albuferas de Adra (modif. de Fabián, 2002).

4.4.4. Evolución de la concentración en clorofila "a"

El estudio de los contenidos en clorofila "a" medidos en el agua de las lagunas ha permitido tener una idea orientativa sobre la biomasa fitoplanctónica que había en esos periodos, ya que se trata de variables correlacionadas. En las lagunas de Campillos, la concentración ha sido muy semejante y la evolución en las diferentes lagunas también. Se han observado incrementos en el mes de diciembre de 1997 respecto a los meses anteriores, y un aumento generalizado en la primavera de 1998 (mayo y junio). Las únicas lagunas de Campillos que tienen un comportamiento diferenciado del resto son la laguna Salada (en la que en mayo de 1998 hubo efectivamente un aumento de clorofila, pero desciende la concentración en junio y agosto) y la laguna de Lobón, en la que las concentraciones son mayores que en el resto (con una media de 13 mg/m^3 , frente a los 5 mg/m^3 aproximadamente del resto de las lagunas de Campillos). Es, por tanto, una laguna con una biomasa fitoplanctónica mayor que la del resto de lagunas de Campillos. Este hecho quizá sea debido a que la presencia de macrófitos en esta laguna no es tan importante como en las demás, lo cual implica una menor competencia trófica.

En Fuente de Piedra las concentraciones de clorofila "a" son mayores que en las lagunas de Campillos (14 mg/m^3 de media), y presentan picos de concentración en mayo y octubre de 1997.

Las lagunas de la Ratosa y la Herriza de los Ladrones tienen un comportamiento similar a la de Fuente de Piedra, pero con una concentración media menor (5 mg/m^3). En Caja y Viso la concentración media también se encuentra en torno a los 5 mg/m^3 , y es algo mayor en las lagunas de Archidona (7 mg/m^3). En estas cuatro lagunas la evolución del contenido en clorofila se asemeja a la evolución en las lagunas de Campillos, con incrementos generalizados en la primavera de 1998, coincidiendo con el aumento del fitoplancton comentado anteriormente.

Las lagunas de la desembocadura del Guadalhorce y las albuferas de Adra son las que presentan una mayor concentración en sus aguas de clorofila "a"; los picos de

concentración se midieron en diciembre de 1997 y durante la primavera y el verano de 1998: el agua de la laguna Eucaliptal tiene una media de 200 mg/m^3 de clorofila "a" (ver figura 4.34.). En el agua de las albuferas de Adra, la mayor concentración de clorofila "a" se midió en octubre de 1998: 109 mg/m^3 en la albufera Honda.

4.4.5. Dinámica de nutrientes y estado trófico

Los dos principales nutrientes limitantes en ecosistemas acuáticos son el nitrógeno y el fósforo, en sus distintas formas.

El nitrógeno se encuentra en las aguas continentales disuelto o particulado. En ambos casos puede estar formando parte de compuestos orgánicos o inorgánicos. Las formas solubles orgánicas son variadas (aminoácidos, proteínas, aminos o ácidos húmicos). Las formas solubles inorgánicas (amonio, nitrito y nitrato) constituyen la principal fuente de nitrógeno para los productores primarios. La presencia de estos compuestos en el medio acuático tiene distintos orígenes: precipitación atmosférica, fijación de nitrógeno atmosférico por determinadas especies de bacterias y cianobacterias, aportes por erosión y lavado del suelo o vertidos urbanos y/o agrícolas.

El fósforo constituye, en muchos sistemas, el nutriente limitante de la producción primaria y es, en consecuencia, determinante del estado trófico de los mismos. Reacciona con cationes como hierro, calcio y aluminio, formando compuestos insolubles que precipitan. Por otra parte, es captado por los organismos del fitoplancton y las algas, o por la vegetación de orla y macrofítica, proceso biológico por el que se incorpora a la cadena trófica. La sedimentación es el único proceso por el que el fósforo es extraído de estos sistemas acuáticos sin emisarios. Los principales aportes de fósforo proceden de fuentes externas: cauces fluviales, ramblas, escorrentía superficial difusa, o de fuentes internas, especialmente por resolubilización del sedimento.

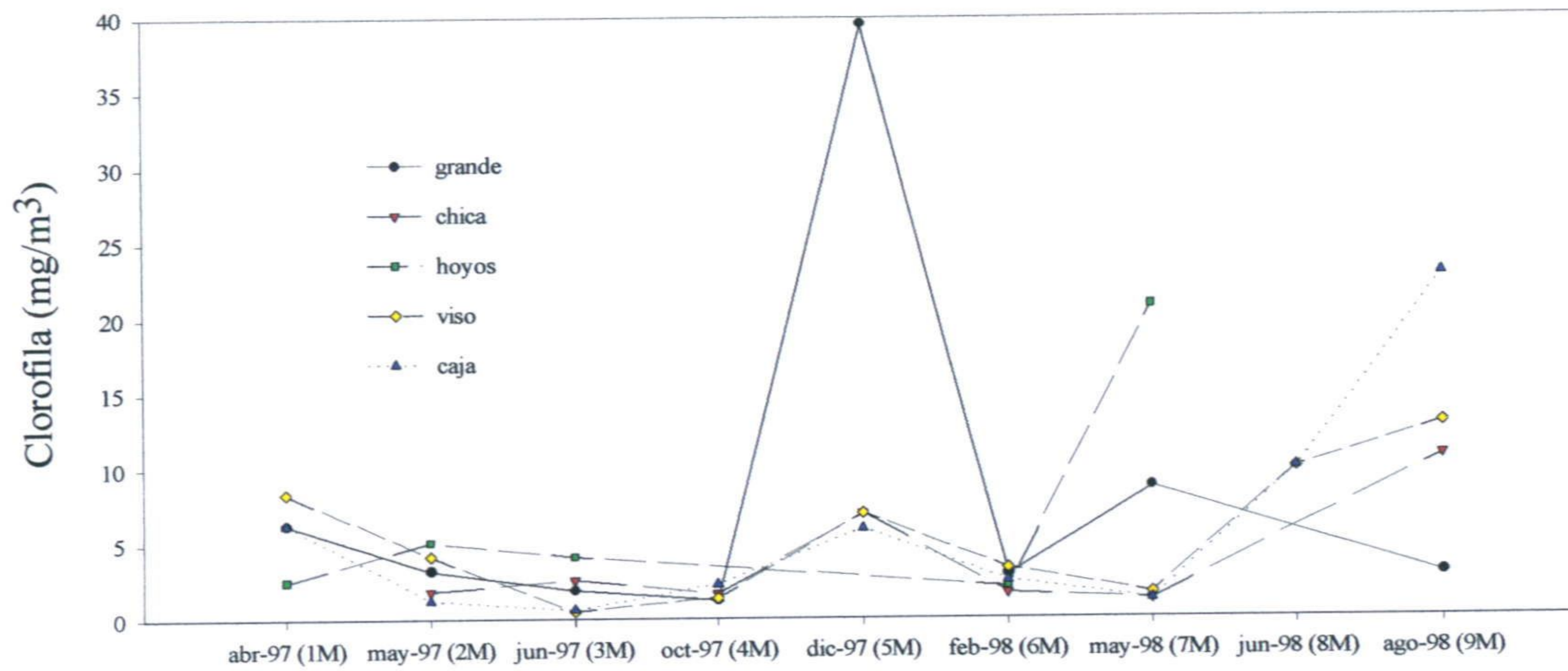
4.4.5.1. Evolución del contenido en nutrientes

Para el estudio de la evolución del contenido en nutrientes, se han realizado gráficos (ver figuras 4.35. a 4.43.) en los que se representan para cada grupo de humedales la evolución de los contenidos en compuestos de N (nitratos, nitritos y amonio) y de P (fosfatos y fósforo total).

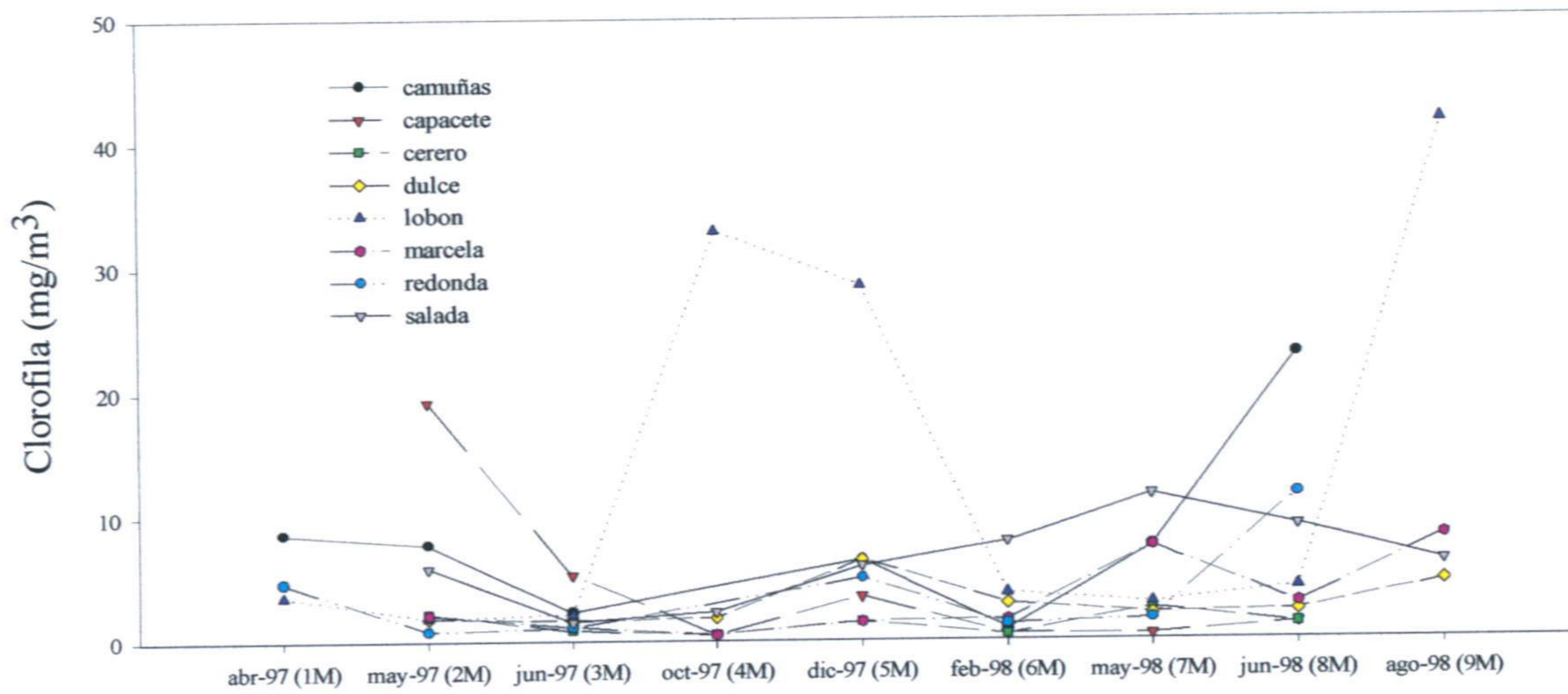
Los nitratos no suelen ser tan abundantes en las aguas superficiales como en las subterráneas, en las que se acumulan y son una de las más importantes fuentes de contaminación de las mismas. Cuando esto ocurre, suele ser consecuencia del lixiviado de los suelos agrícolas, fertilizados en exceso con compuestos de nitrógeno. En las zonas húmedas estudiadas se han encontrado concentraciones elevadas de nitratos en aguas subterráneas; por ejemplo, en los piezómetros de la laguna Dulce de Campillos se midieron, durante la campaña de muestreo de mayo de 1998, concentraciones de nitratos de más de $3500 \mu\text{M}$. También en las aguas de los arroyos que vierten aguas residuales a la laguna de Fuente de Piedra se midieron concentraciones elevadas, en los arroyos Santillán y Charcón, del orden de $600 \mu\text{M}$.

En las aguas de las lagunas las concentraciones que se han medido han sido menores, entre 20 y $40 \mu\text{M}$. Respecto a los nitritos, iones más perjudiciales que los nitratos para la salud humana, las concentraciones no superan en las aguas de las

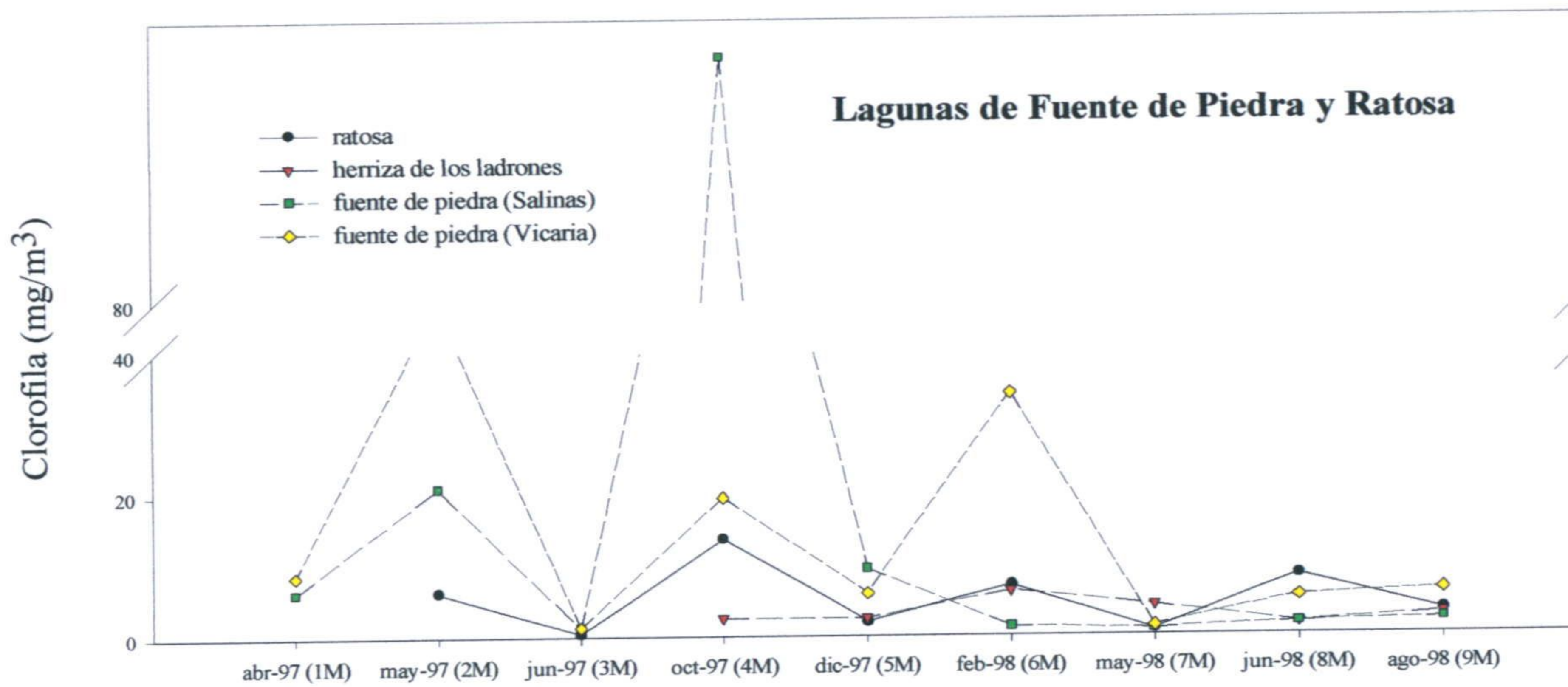
Lagunas de Archidona y Antequera.



Lagunas de Campillos



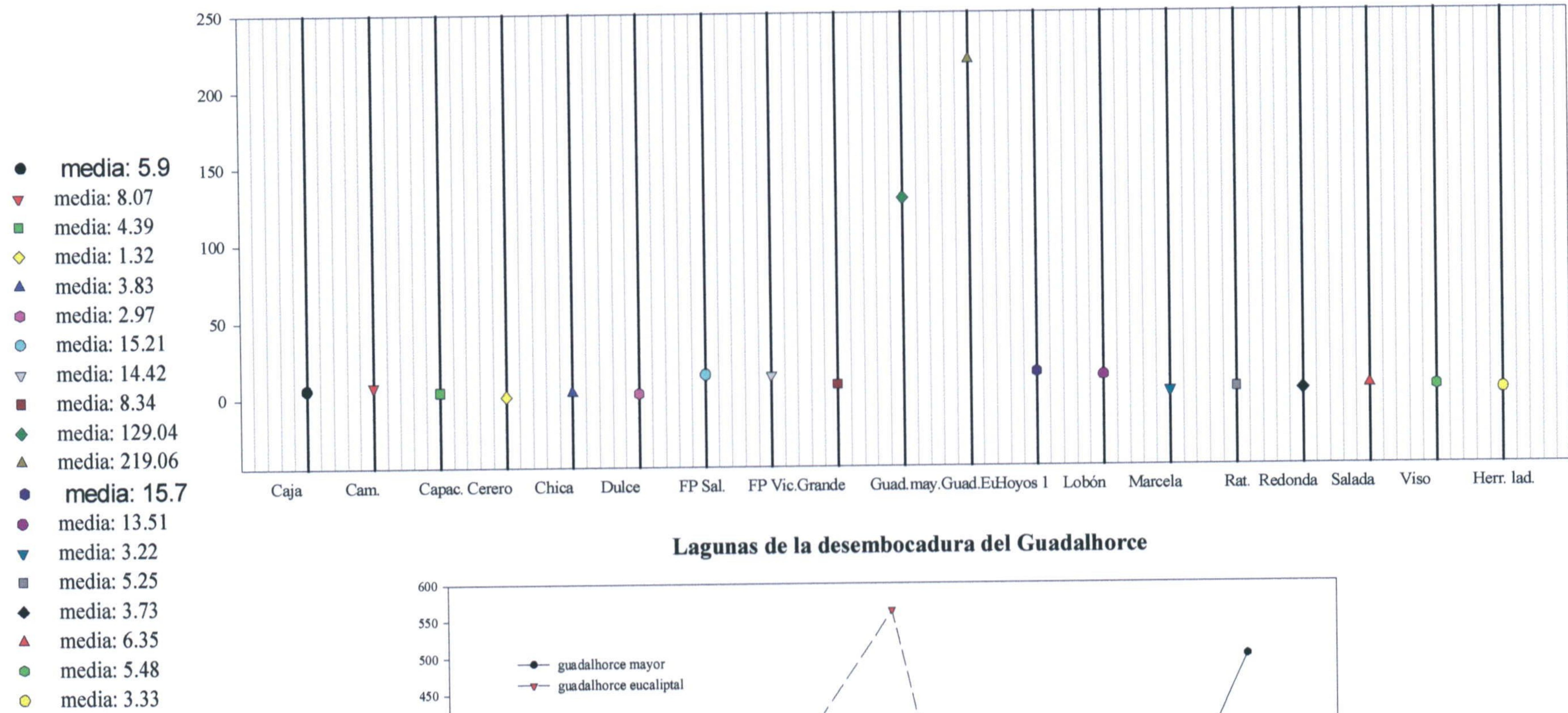
Lagunas de Fuente de Piedra y Ratosa



Muestreos

Figura 4.34.I Evolución del contenido en clorofila "a" de las lagunas estudiadas

Concentraciones medias de clorofila "a" en las lagunas estudiadas



Lagunas de la desembocadura del Guadalhorce

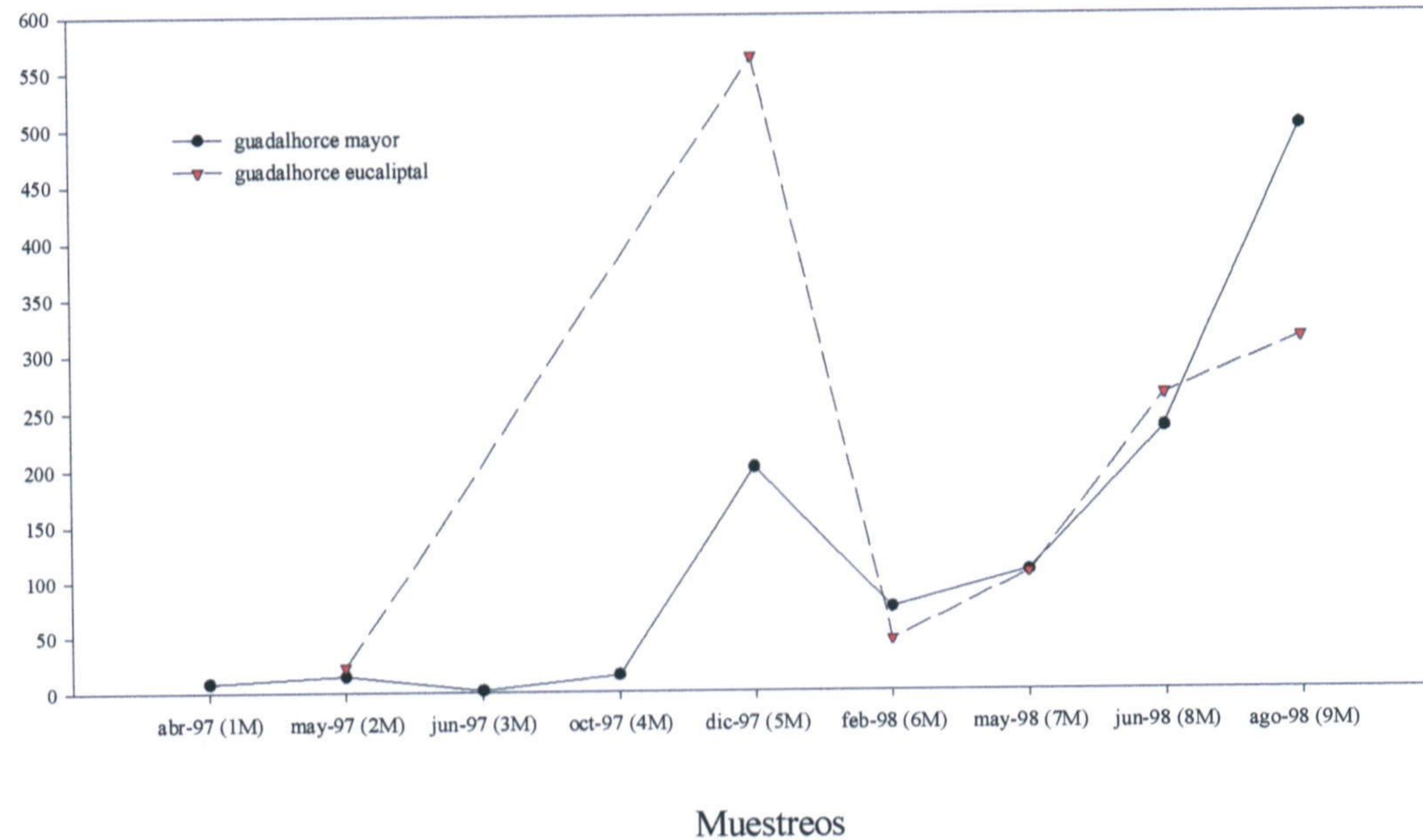


Figura 4.34. II Evolución del contenido en clorofila "a" en las lagunas estudiadas y medias de concentración

lagunas el valor de 1 μM . En aguas subterráneas y aguas residuales se han medido concentraciones de hasta 20 μM .

Las concentraciones de nitratos en las aguas de las lagunas de Campillos están comprendidas entre 10 μM en la laguna de Lobón y 55 μM en la laguna Marcela, cuyas aguas están siendo posiblemente contaminadas por los lixiviados de la escorrentía superficial. Se trata de una laguna rodeada completamente por cultivos de olivar, y las pendientes de su cuenca vertiente son más pronunciadas que en el resto de las lagunas de Campillos. Concentraciones medias de 45 μM se han determinado en las lagunas Salada y Redonda, también rodeadas por cultivos de olivar y cereal, aunque las pendientes de su cuenca son algo más suaves que en el caso de la laguna Marcela. En el resto de las lagunas de Campillos, las concentraciones medias tienen un valor en torno a 25 μM . Las desviaciones respecto a estos valores medios son muy elevadas; sobre todo en la laguna de Marcela, ya que en uno de los muestreos (febrero de 1998) se midió un pico de cerca de 300 μM de nitratos en el agua de esta laguna, y este mismo incremento también se detectó en las lagunas de Capacete, Dulce y Salada.

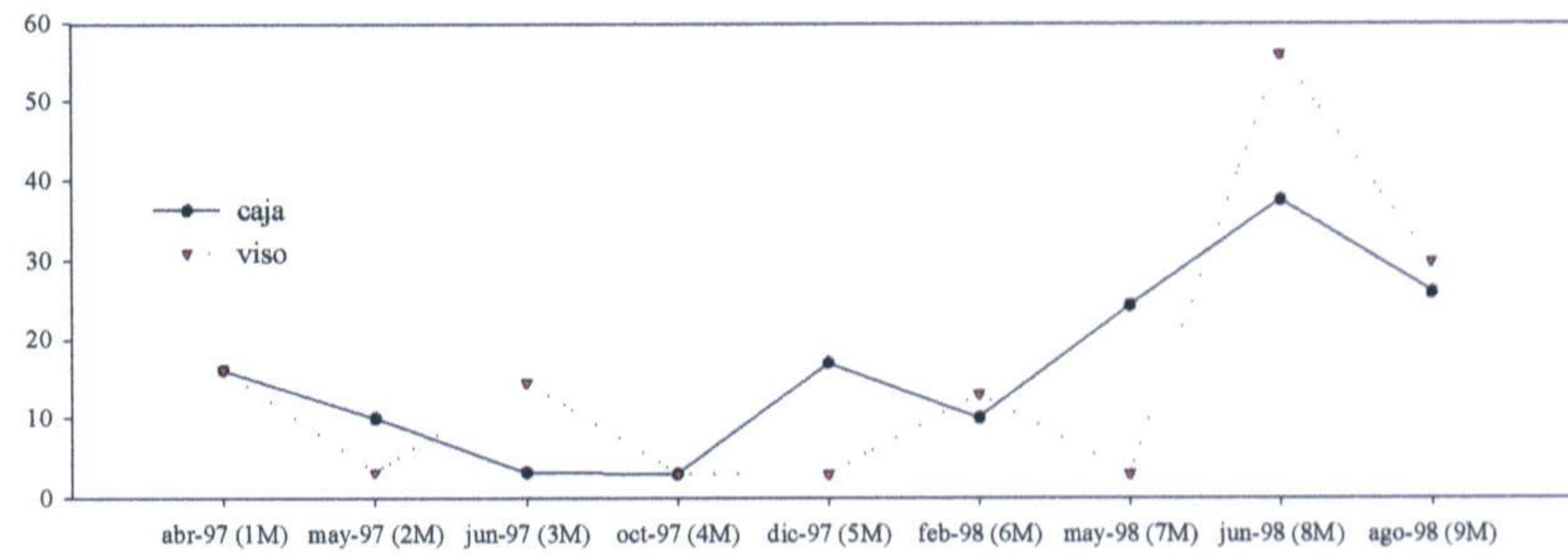
La evolución temporal de los contenidos en nitratos en las lagunas de Campillos es similar en todo el complejo palustre. Se advierte un incremento de los contenidos en los meses de invierno, y el mes con menor concentración es el de octubre: mayores concentraciones en los meses lluviosos y concentraciones mínimas tras el estiaje, lo cual es lógico ya que las aguas de escorrentía superficial difusa hacia estas lagunas endorreicas han de contener concentraciones elevadas de nitratos procedentes del lixiviado de los cultivos adyacentes.

En el resto de las lagunas de Málaga y en las albuferas de Adra, la concentración en el agua, tanto de nitratos (en torno a 10 μM) como de nitritos (en torno a 0.5 μM), es menor que las concentraciones medidas en las lagunas de Campillos. La evolución temporal, por otra parte, es también diferente; en las lagunas de Archidona y Guadalhorce se aprecia una tendencia al aumento en la concentración de nitratos en el agua, mientras que la concentración de nitritos parece mantenerse estable sin incrementos significativos; en Fuente de Piedra y Ratosá se observa un aumento durante el invierno de 1997, pero las concentraciones se mantienen elevadas durante el verano de 1998, aunque descienden al final del mismo.

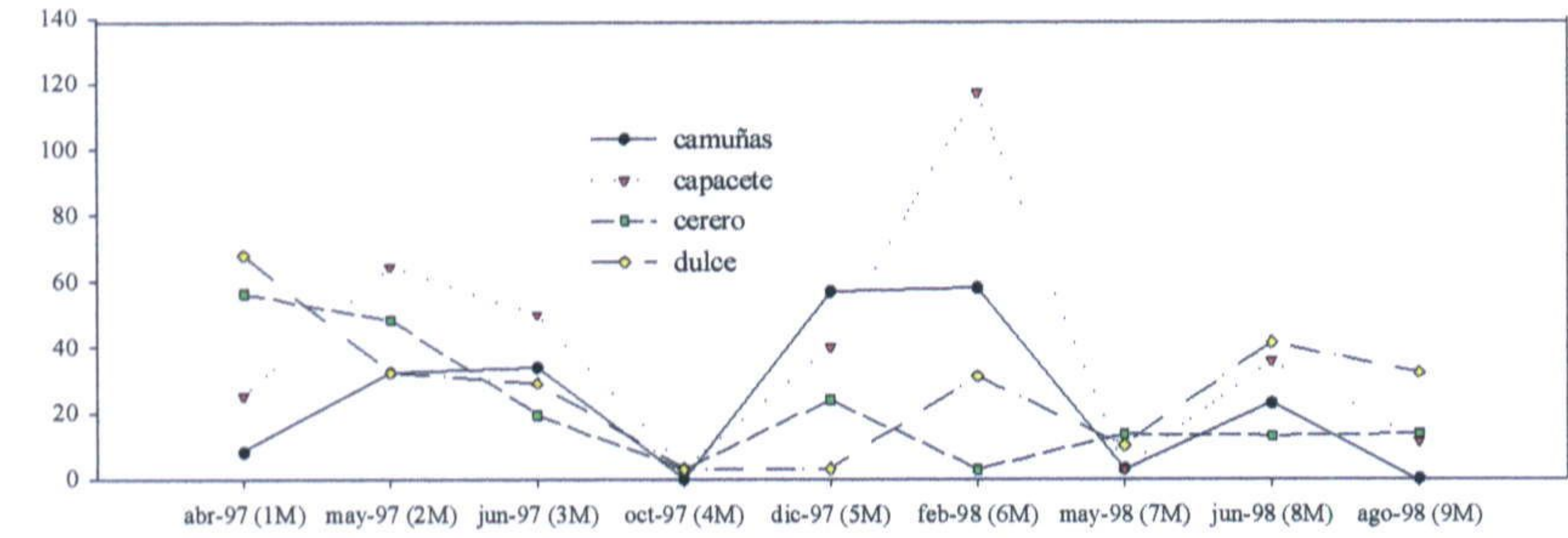
La evolución de las concentraciones del ion amonio, que es la forma iónica más reducida del nitrógeno, puede apreciarse en la figura 4.37. Las lagunas de Camuñas, Capacete, Ratosá y Marcela son las que presentan en el agua unos mayores contenidos medios en este ion, entre 10 y 20 μM ; sin embargo, la característica más peculiar de la evolución del contenido en amonio en las aguas de las lagunas a lo largo del periodo de control incluido en este trabajo es su notable fluctuación: en todos los casos la desviación típica supera o es semejante a la media de las medidas en los nueve muestreos estudiados.

Las proporciones entre estos tres tipos de compuestos en el agua representan el equilibrio de multitud de procesos (Margalef, 1991). Lo normal es encontrar la mayor fracción en forma de nitrato, que es la forma más oxidada. La concentración relativa de amonio y de nitrito será mayor donde la descomposición de la materia orgánica es más activa, es decir, cerca del fondo de las lagunas o en aquellos momentos en los que los procesos de descomposición revisten mayor intensidad.

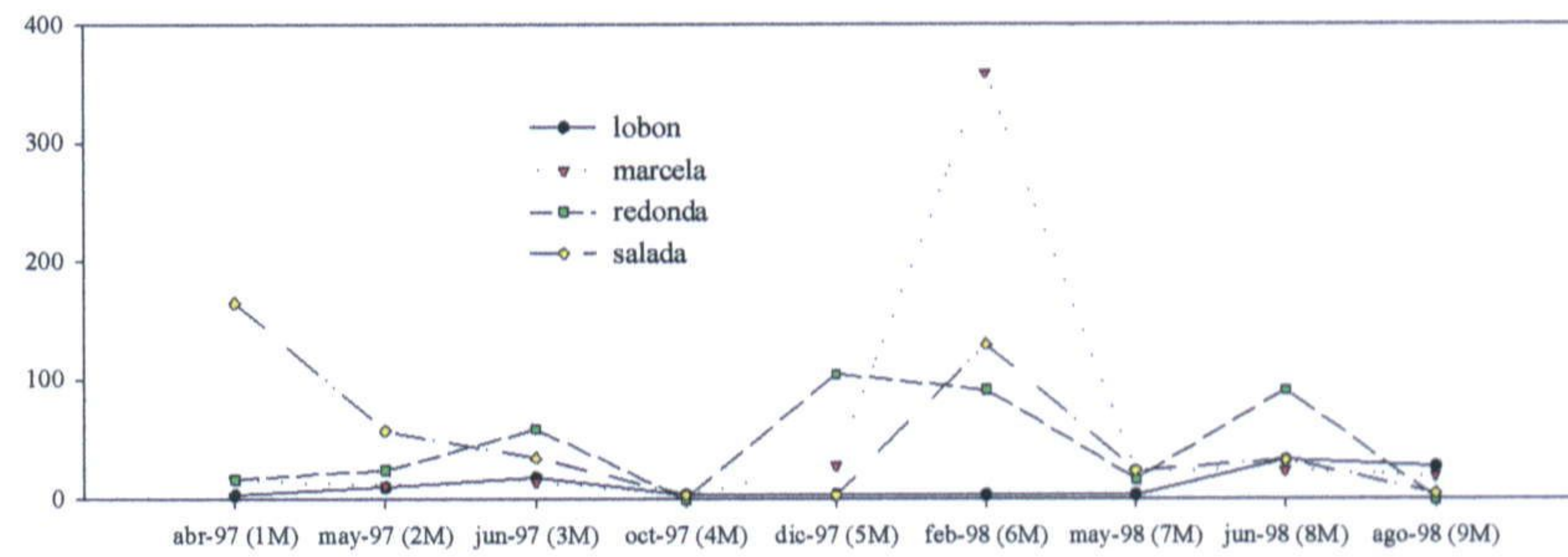
Lagunas de Caja y Viso



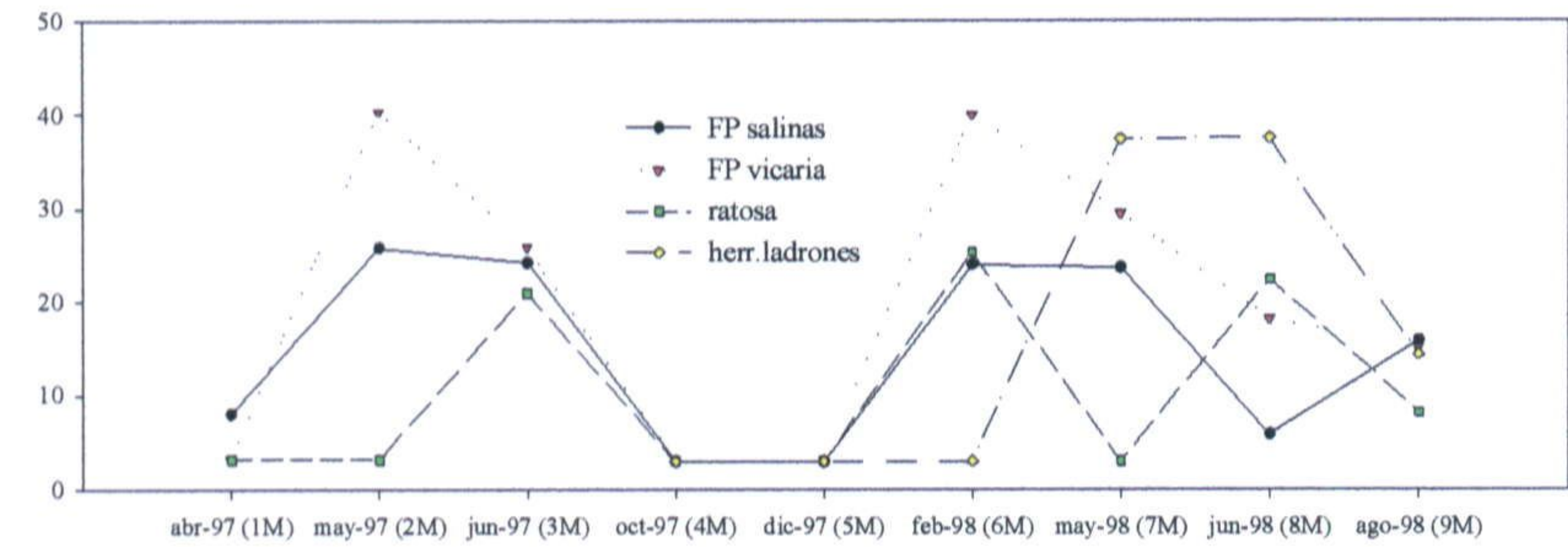
Lagunas de Campillos



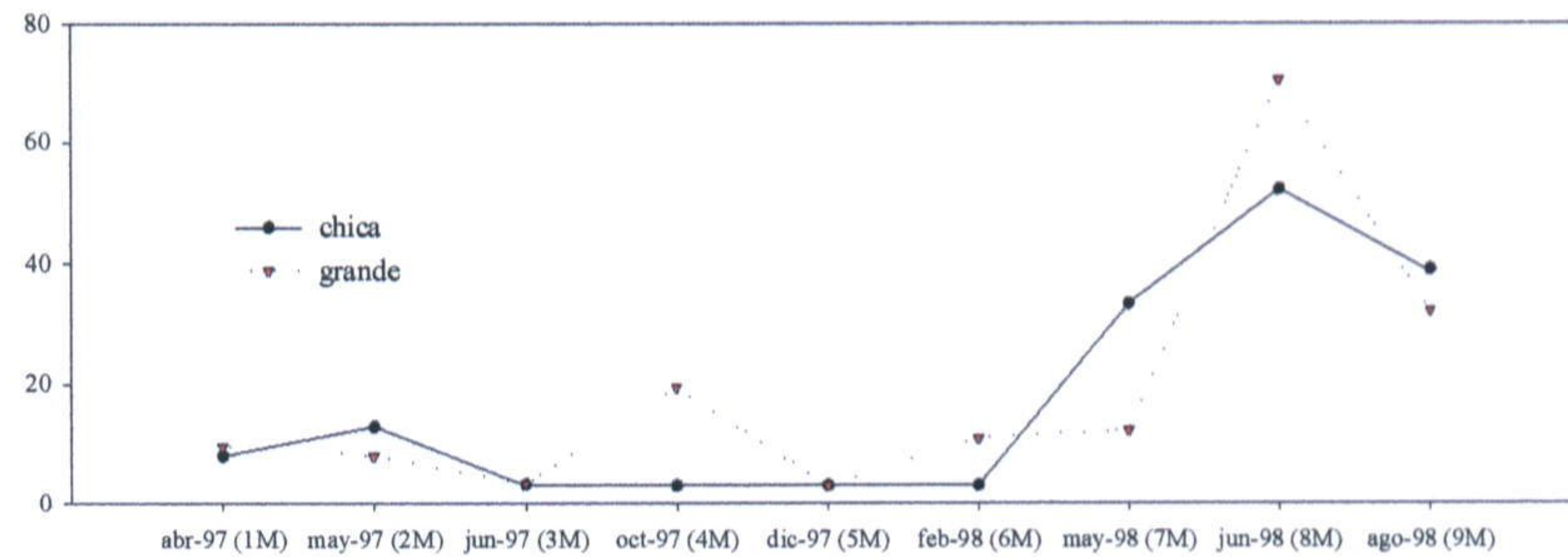
Lagunas de Campillos



Lagunas de Fuente de Piedra y Ratosa



Lagunas de Archidona



Lagunas del complejo de la desembocadura del Guadalhorce

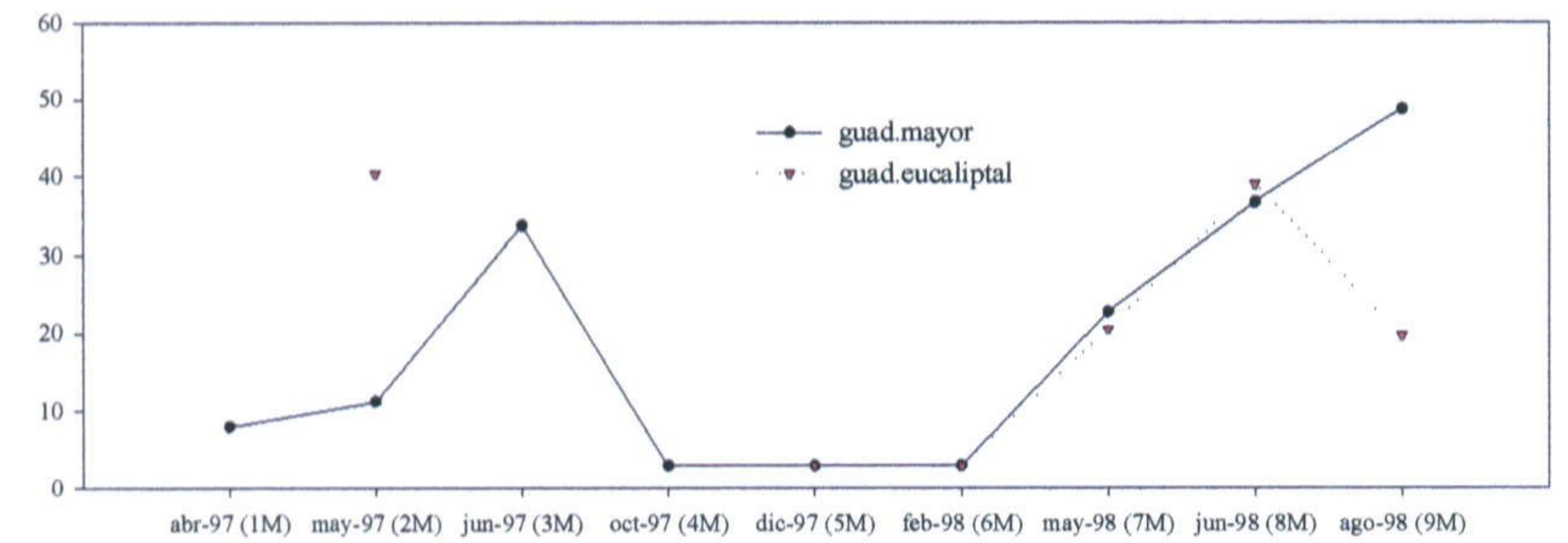


Figura 4.35. Evolución del contenido en nitratos (µM) en las lagunas estudiadas

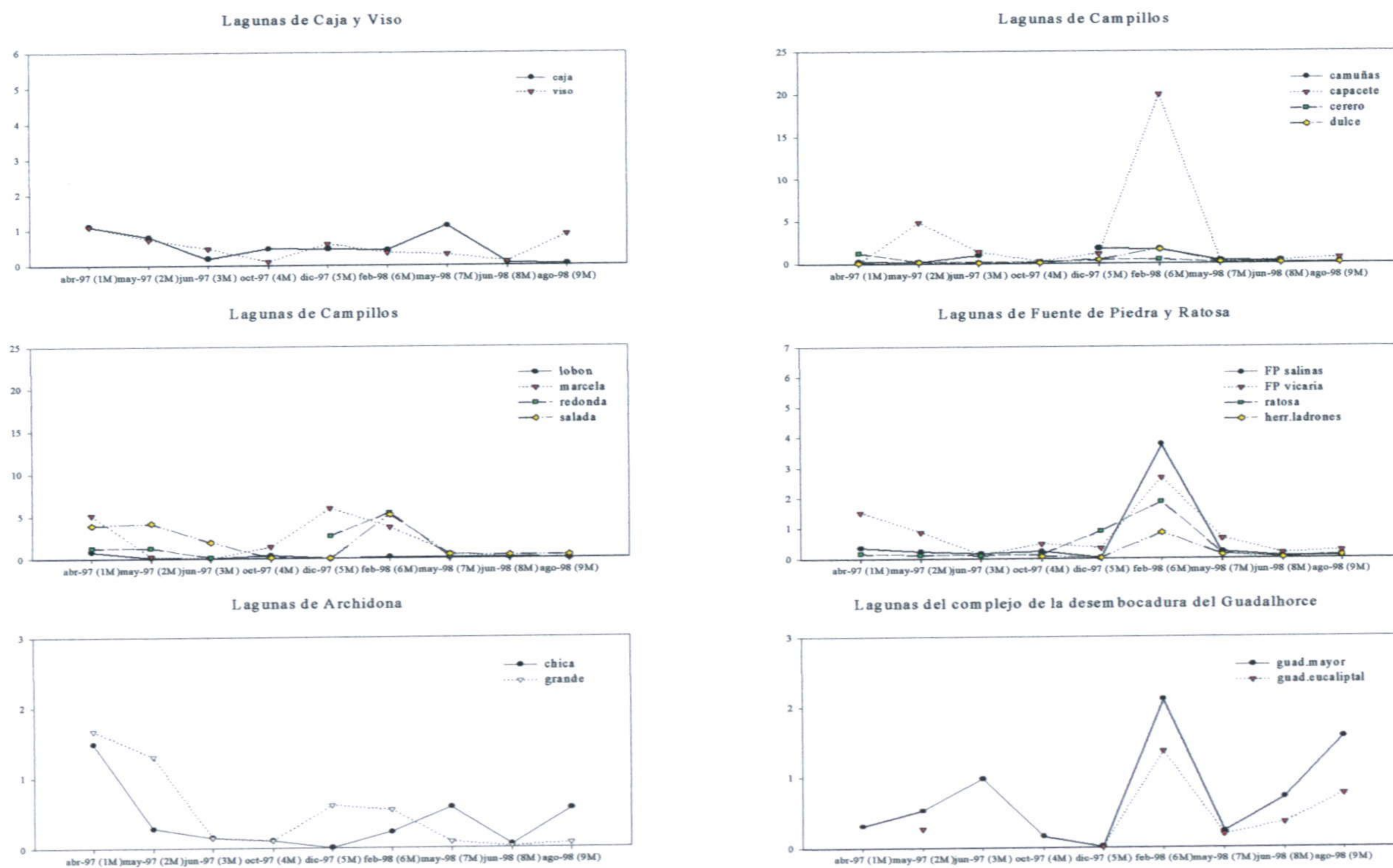


Figura 4.36. Evolución del contenido en nitritos (μM) en las lagunas estudiadas

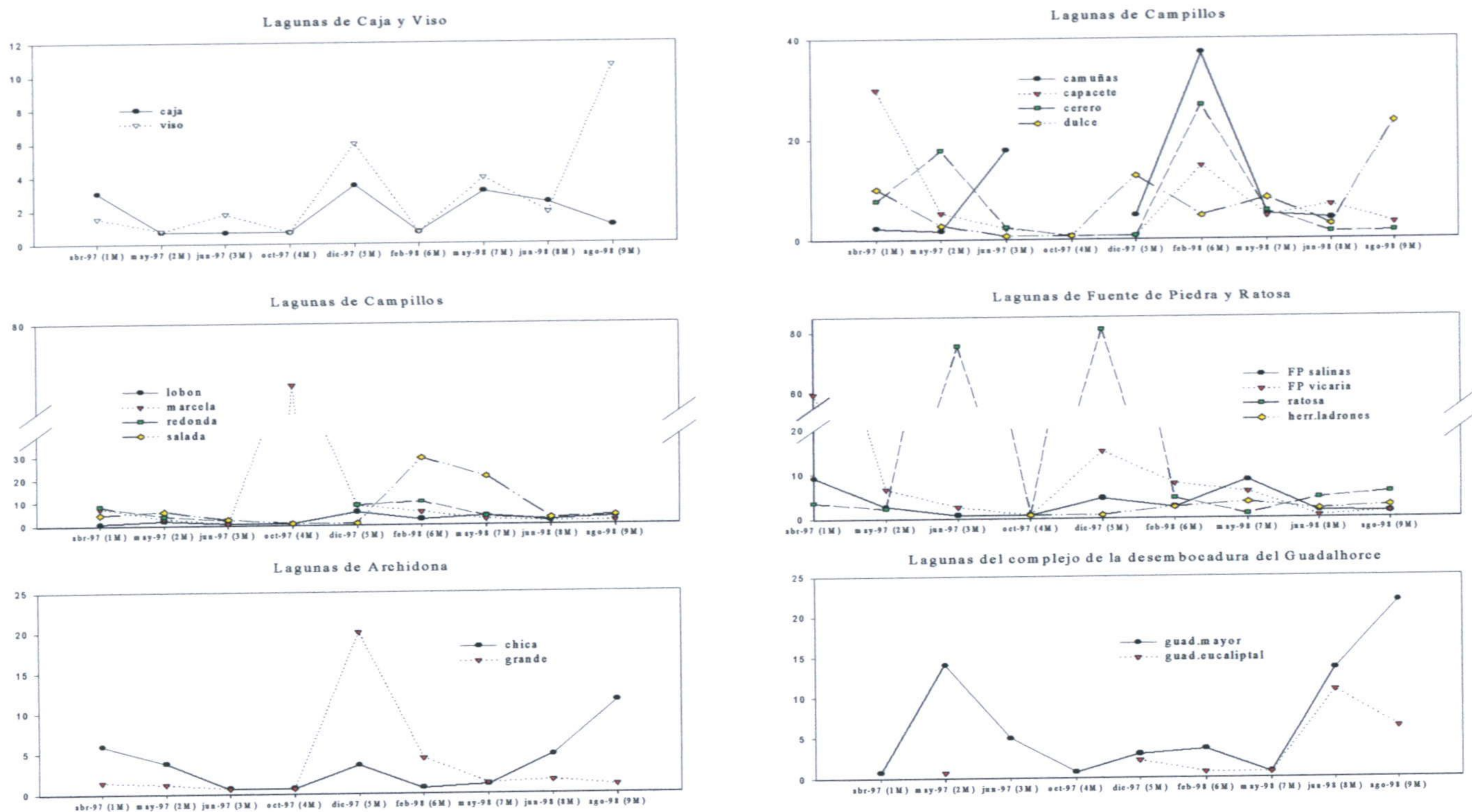


Figura 4.37. Evolución del contenido en ion amonio (μM) en las lagunas estudiadas

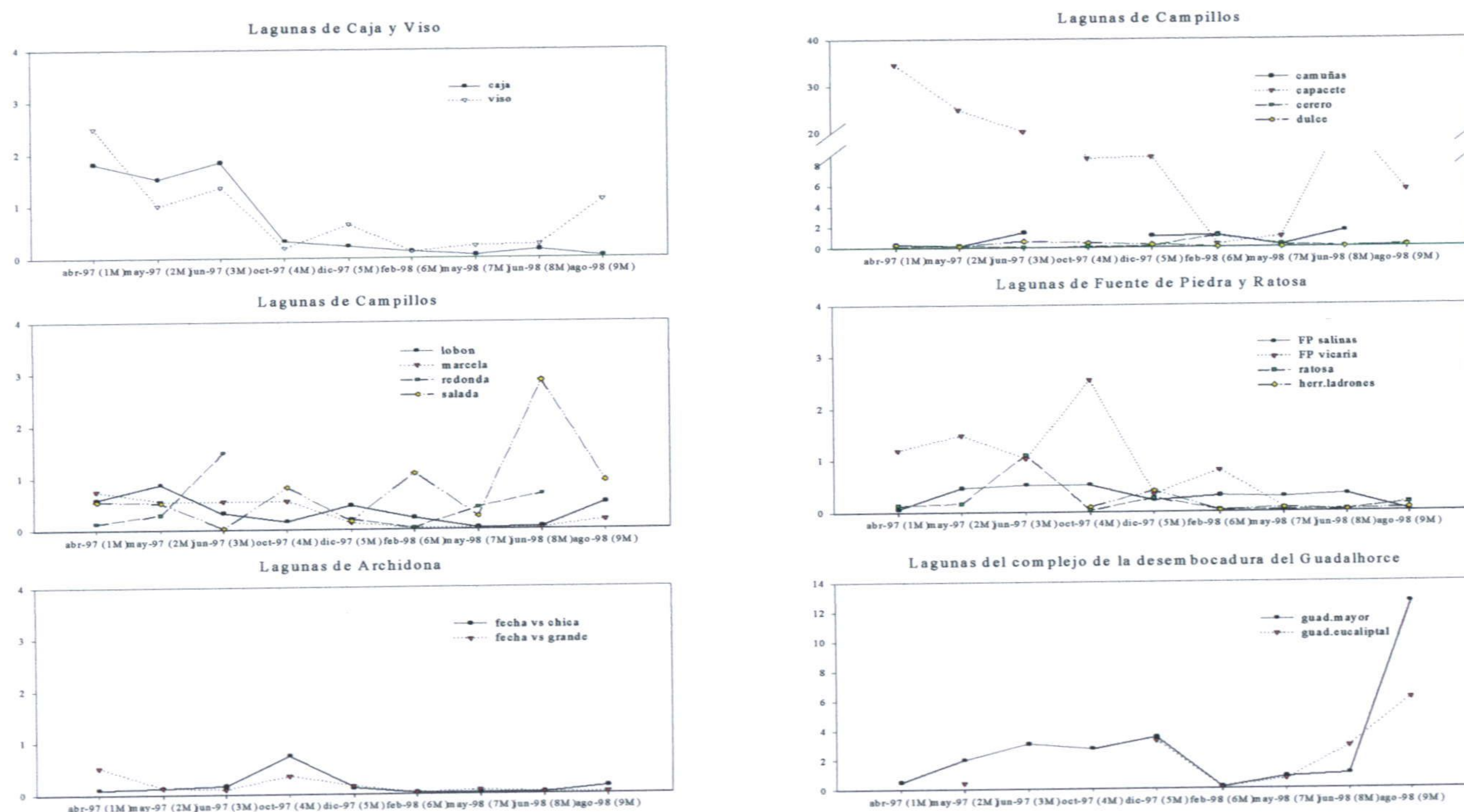


Figura 4.38. Evolución del contenido en fosfatos (μM) en las lagunas estudiadas

Como se ha dicho, el fósforo constituye en muchos sistemas el nutriente limitante de la producción primaria y resulta determinante del estado trófico de los mismos. Es un elemento muy activo y reacciona con cationes como Fe^{3+} , Ca^{2+} y Al^{3+} , formando compuestos insolubles que precipitan. Es captado por los organismos, proceso biológico por el que se integra en la fracción particulada y se incorpora a la cadena trófica. La sedimentación puede detraer una parte del fósforo presente en el agua. Los principales aportes de fósforo proceden de fuentes externas, como entradas difusas, afluentes, ramblas, cauces artificiales o de fuentes internas, por resolubilización del sedimento.

En relación con el contenido en ion fosfato (ortofosfato), al presentar el agua de estas lagunas una alcalinidad relativamente elevada y ser la mayor parte de ellas eutróficas, actúan como una trampa de fósforo en su sedimento: el fósforo proviene del lixiviado de las rocas que lo contienen y de la contaminación de carácter agrícola o ganadero de los terrenos de sus cuencas vertientes. A su vez, parte del fósforo que interviene en el ciclo orgánico queda inmovilizado en el sedimento, en parte como fosfato cálcico o como fosfato férrico. Si aumenta el pH por la fotosíntesis, una fracción considerable del fosfato precipita con el carbonato cálcico y el sulfato cálcico. El fosfato férrico se produce al oxidarse el ion ferroso que aparece en solución en condiciones de baja tensión de oxígeno. Si el sedimento vuelve a encontrarse en condiciones reductoras, fenómeno que es poco importante en estas lagunas tan someras y mezcladas continuamente por la acción eólica, puede de nuevo liberarse fósforo. En fangos con sulfhídrico, la formación de sulfuros de hierro suele acompañar a la liberación de fósforo, pero siempre queda una fracción del fósforo inmovilizada en el sedimento de manera irreversible.

Las mayores concentraciones en ion fosfato se han medido en la laguna de Capacete, contaminada desde hace tiempo por vertidos de purines provenientes de una granja de cerdos próxima. La concentración media en el agua de esta laguna ha sido de $17.4 \mu\text{M}$, seguida de las lagunas del Guadalhorce, con $2.5 \mu\text{M}$; es decir, la laguna de Capacete sigue manteniendo una elevada concentración en sus aguas de fósforo inorgánico disuelto aunque se prohibió el vertido. Las menores concentraciones se han medido en las aguas de la laguna Grande y Chica de Archidona ($0.15 \mu\text{M}$). Es curioso el hecho de que, en lo que se refiere a las lagunas de Antequera, el fósforo es más abundante en Viso ($1 \mu\text{M}$ de media) que en Caja ($0.6 \mu\text{M}$), lo que posiblemente se debe a la continua resuspensión del sedimento del fondo de la laguna de Viso a consecuencia de la acción eólica. En las albuferas de Adra la concentración de fósforo total y de ortofosfato fue superior en el hipolimnion, sobre todo en la laguna Honda, probablemente debido al consumo de este elemento por el fitoplancton y posterior precipitación

4.4.5.2. Dinámica de la relación N/P:

La acumulación relativa de los elementos N, P y C en el cuerpo de los organismos es muy grande, de modo que la disponibilidad de estos elementos limita el desarrollo de la vida. En el caso del carbono, aunque su consumo sea grande, puede reponerse en forma de CO_2 procedente de la reserva atmosférica. Por otra parte, el factor de concentración relativo del carbono es menos elevado; la proporción entre los tres elementos indicados, C:N:P, en número de átomos, en el cuerpo de los organismos, es alrededor de 100:14:1. El carbono, por tanto, no suele ser limitante. El nitrógeno ocupa una posición intermedia puesto que existe una enorme reserva de nitrógeno en forma gaseosa en la atmósfera, pero sólo un reducido grupo de organismos (bacterias) pueden utilizarlo. El fósforo es el que ocupa una posición crítica porque no hay una reserva de fósforo comparable a la atmosférica en los casos del carbono o del nitrógeno; numerosos indicios atestiguan que la concentración y el suministro de fósforo regulan la producción básica en las aguas naturales (Margalef, 1991).

Las concentraciones medias calculadas de nitrógeno y fósforo total en el agua de las lagunas de Málaga (figuras 4.39. a 4.42.) no han superado, en el caso de nitrógeno total, el valor de $370 \mu\text{M}$ (laguna de Camuñas) y en el caso del fósforo total, los $35 \mu\text{M}$ (laguna de Capacete). Las lagunas con menores concentraciones en el agua de estos elementos han sido la Herriza de los Ladrones (en el caso de nitrógeno total: $48.5 \mu\text{M}$) y la laguna Grande de Archidona (en el caso del fósforo total: $0.8 \mu\text{M}$).

La evolución en el contenido de nitrógeno total se correlaciona con la anteriormente comentada del ion nitrato, y lo mismo ocurre con el fósforo total y los fosfatos. La evolución de la relación N/P muestra en que medida son dependientes los sistemas del fósforo; a mayor relación N/P, hay una menor cantidad de fósforo disponible en el medio y, por tanto, existirá una mayor dependencia del medio respecto de este elemento. En este sentido, si esa relación, expresada como un valor adimensional, es mayor de 14, el nutriente limitante será el fósforo. Se observan relaciones elevadas de N/P en las lagunas de Campillos (Marcela, Salada y, sobre todo, Redonda) en el mes de febrero de 1998, en el que probablemente hubo un aporte importante de nitrógeno al sistema.

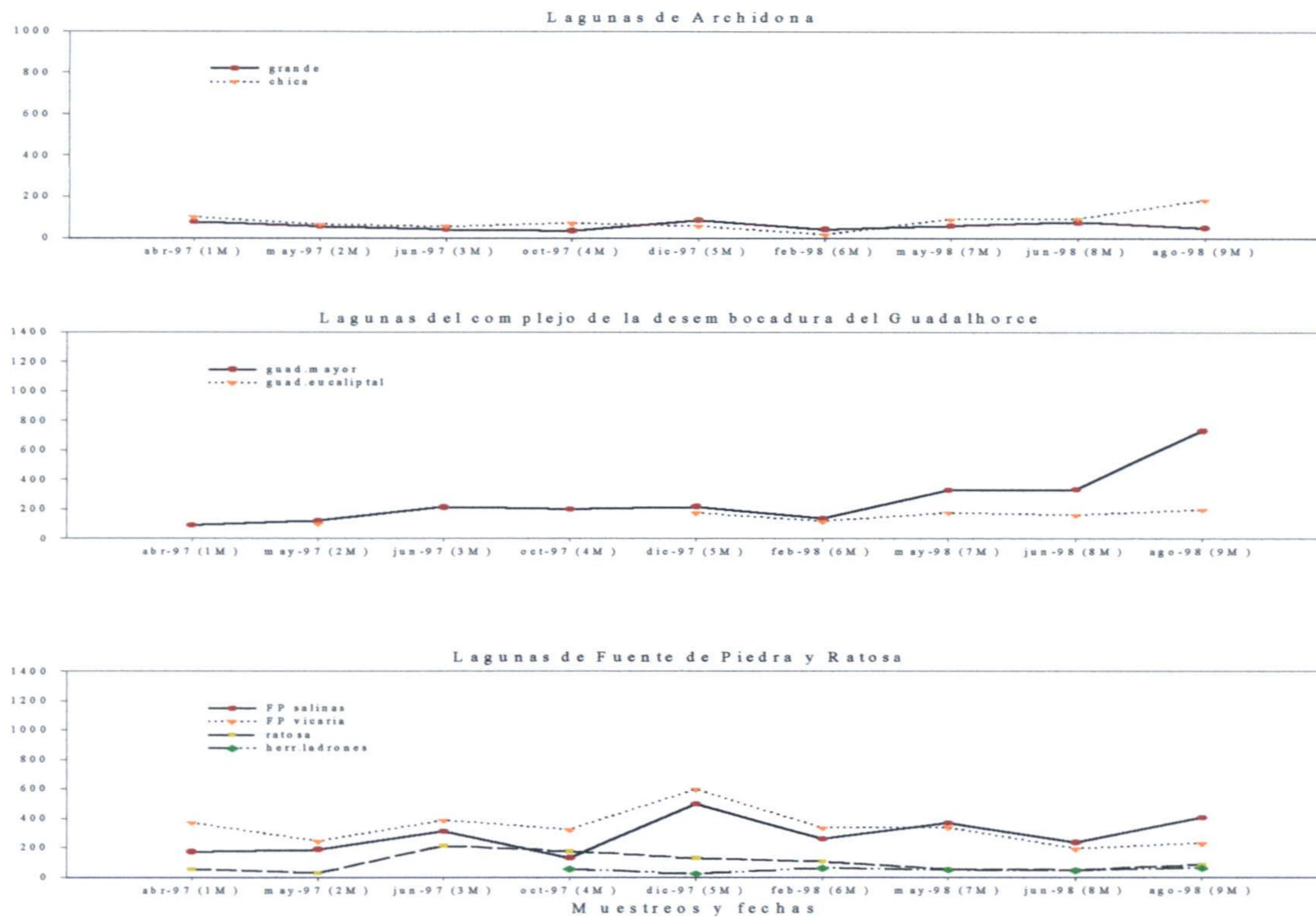


Figura 4.39. Evolución del N_t (μM) en las lagunas de Archidona, Guadalhorce, Fuente de Piedra y Ratosa

Los valores medios de la relación N/P durante el periodo de estudio reflejan los diferentes grados de dependencia de este elemento en las diferentes lagunas. Los mayores valores se encuentran en Fuente de Piedra, con un valor de la mencionada relación de 150, y algunas lagunas de Campillos, como las lagunas Redonda y Salada, con un valor próximo a 170. Las lagunas de Archidona tienen una relación N/P en sus aguas de 100 (laguna Grande) y de 72 (laguna Chica). Los valores más bajos corresponden a Caja y Viso (relación N/P próxima a 50) y, sobre todo, a la laguna de Capacete, con una relación de 12 ya que, como hemos comentado anteriormente, se encuentra contaminada.

4.4.5.3 Estado trófico de los humedales

La O.C.D.E. (1982) define el estado trófico de un sistema lagunar en función de las concentraciones medias de fósforo total en sus aguas (aunque existen otras definiciones en las cuales intervienen otras variables además del contenido en fósforo total, como por ejemplo la profundidad del disco de Secchi). En la figura 4.43. aparecen las concentraciones medias halladas para el periodo de estudio para todas las lagunas incluidas en este trabajo.

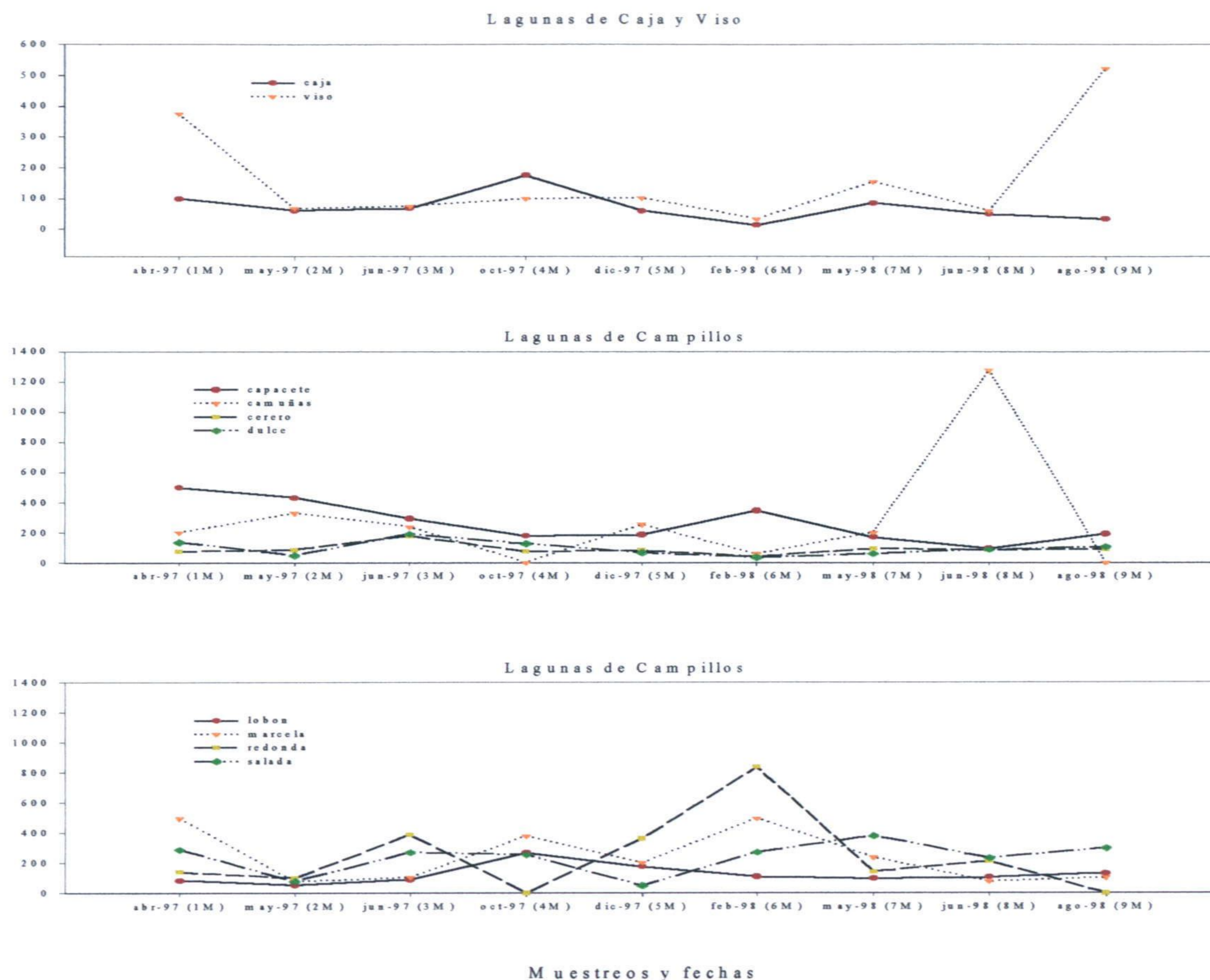


Figura 4.40. Evolución del N_t (μM) en las lagunas de Antequera y Campillos

A la vista de dicha figura, la mayor parte de las lagunas son eutróficas o hipereutróficas. Las únicas lagunas cuyas concentraciones medias de fósforo total las incluyen dentro del rango de mesotróficas son las lagunas Grande y Chica de Archidona, y la Herriza de los Ladrones. Las lagunas de Antequera (Caja y Viso) son eutróficas, y las de Campillos, salvo Dulce y Redonda que son eutróficas, son hipereutróficas, como las de la desembocadura del Guadalhorce y la albufera Honda. La albufera Nueva entra en el rango de las eutróficas, en el límite con las hipereutróficas.

4.4.6 Variaciones diarias

En las figuras 4.44. y 4.45. se puede observar la evolución diaria de la temperatura, pH, oxígeno disuelto y C.E. del agua de una de las lagunas incluidas en este trabajo, la laguna de Cerero. Las medidas, tomadas cada 30 minutos, se realizaron en un bidón abierto de 100 l de capacidad, y estaban representadas las comunidades principales que en ese momento existían en la laguna: cladóceros, copépodos, rotíferos, ostrácodos, comunidades fitoplanctónicas y macrófitos.

En la figura 4.44. se han representado las variables mencionadas durante un periodo de 48 h. Es evidente la correlación positiva que existe entre temperatura, pH y oxígeno disuelto. Durante el día, los organismos fotosintéticos desprenden oxígeno, y la concentración de esta molécula va aumentando en el agua, alcanzando el máximo entre las 16 y las 18 h, en este caso en torno a 9 mg/l; estos mismos organismos consumen CO_2 , lo cual desplaza el equilibrio carbónico - carbonatos, y aumenta el pH del medio. Durante la noche ocurre al contrario, en el transcurso de la fase oscura de la fotosíntesis se desprende CO_2 y, tanto el pH como el contenido en oxígeno disuelto (éste debido a la respiración), disminuyen. Es necesario aclarar que, en sistemas muy tamponados, las



Figura 4.41. Evolución del P_i (μM) en las lagunas de Archidona, Guadalhorce, Fuente de Piedra y Ratosa

variaciones de pH no son importantes. En este caso el rango de variación de pH es pequeño, aproximadamente de 8.8 a 9.2.

La temperatura del aire y del agua están comprendidas en un rango entre 12 y 30 °C; las medidas se tomaron en el mes de abril (figura 4.44.). El retraso que se observa en los máximos diarios entre la temperatura del aire y del agua no es muy importante, ya que el volumen de agua es pequeño, la máxima temperatura del agua se midió a las 13 h, y la del aire a las 15 h aproximadamente. La pendiente de ascenso de temperaturas, a partir de las 8 h, es más pronunciada que la de descenso térmico, a partir de las 15 h, lo

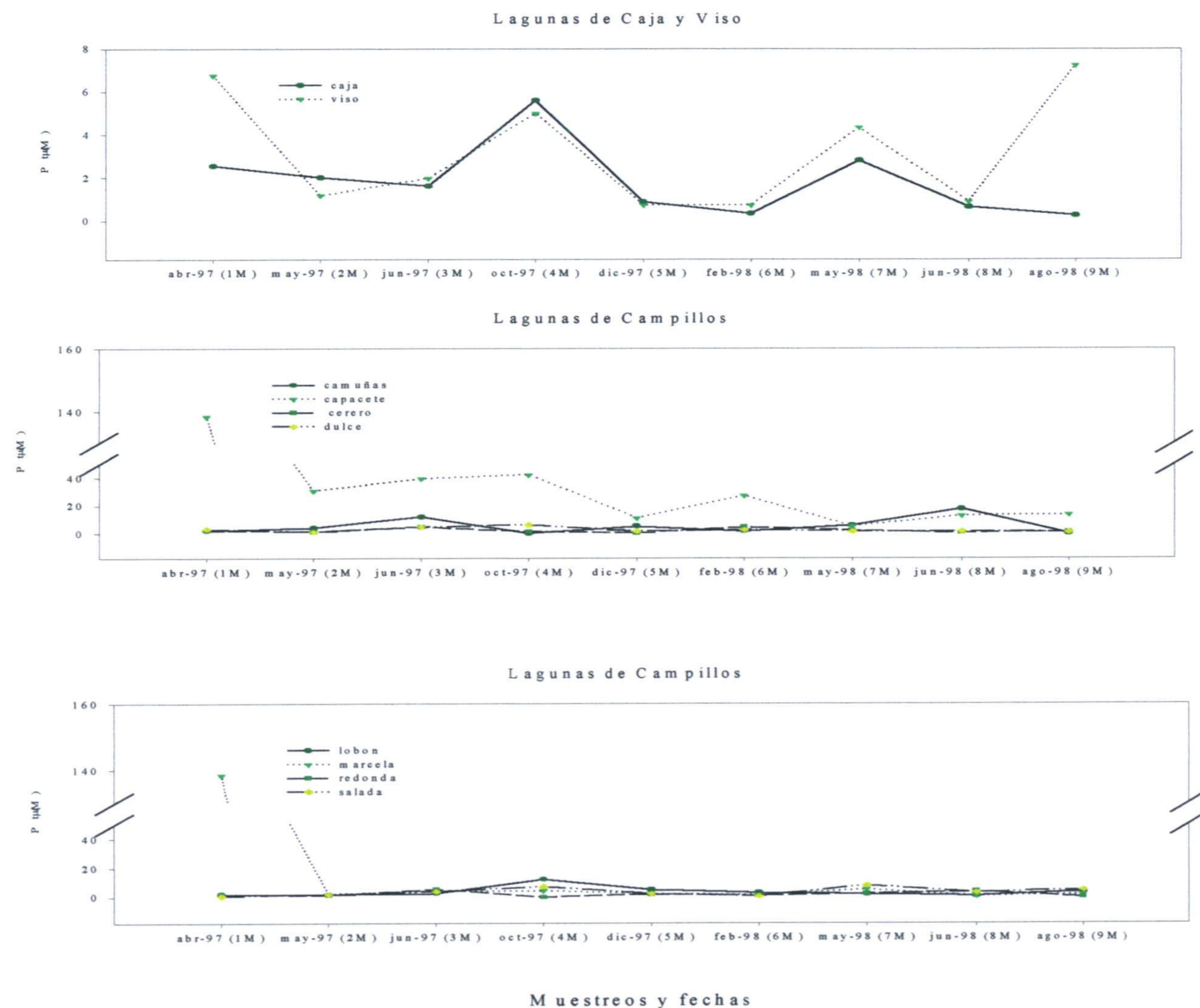


Figura 4.42. Evolución del P_i (μM) en las lagunas de Antequera y Campillos

cual debe ser debido a la localización del punto de medida, al que la sombra de una edificación cercana afectaba a partir de las 15 h.

La C.E. del agua, en torno a 5 mS/cm, asciende lógicamente muy poco durante las 48 h que duró el primer experimento y, sin embargo, se pueden observar dos periodos de ascenso que coinciden con los máximos de temperatura de agua y aire, y, lógicamente, con los máximos valores de evaporación.

En la figura 4.45. se han representado los resultados obtenidos en el siguiente experimento, en el que se mantuvo el dispositivo de recogida de datos desde el 15/5 al 23/5 de 1999. En lo que se refiere al pH y al contenido en oxígeno disuelto en el agua, la evolución es similar a la que se registró en el experimento anterior, salvo que el pH es, en este caso, algo menor, quizá debido a la formación de ácidos húmicos desde que comenzó el primer experimento, un mes antes. Se observan picos relativos de concentración de oxígeno, coincidiendo con días en los que también se registraron altas temperaturas, concretamente el 20 y 21/5/1999.

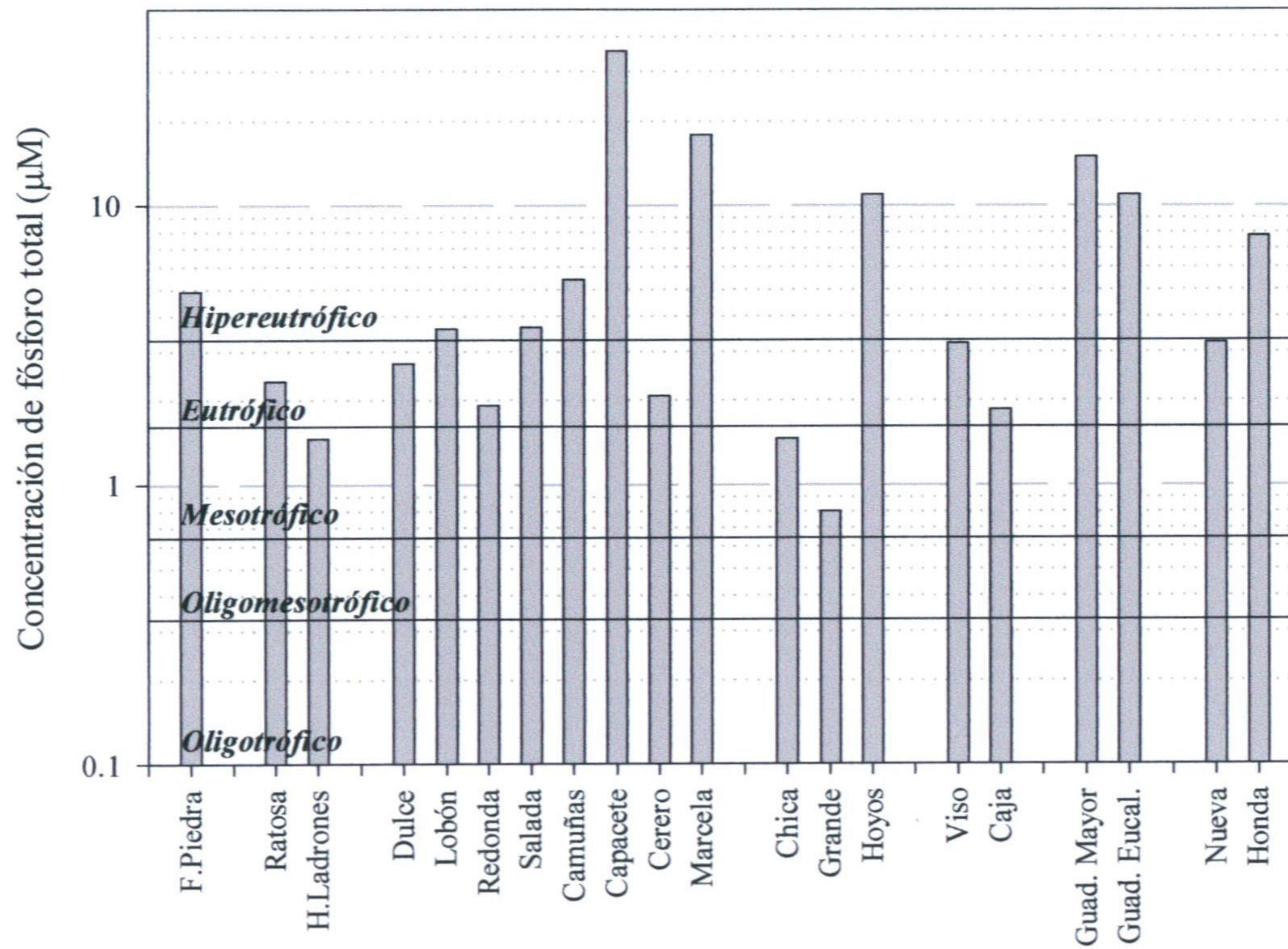


Figura 4.43. Estado trófico de los humedales estudiados

La temperatura del aire y del agua (ver figura 4.45.) raramente desciende de 10 °C, y la temperatura del aire alcanza el máximo en dos días consecutivos, 22 y 23/5/1999. La temperatura del agua no supera en general 40°C. En este caso (figura 4.45.) se han representado también valores de presión atmosférica (cuadrados) y potencial redox (rombos). Por lo que respecta a la presión atmosférica, durante el día 18/5/1999 se produjeron escasas precipitaciones y así las temperaturas son consecuentemente moderadas; se observa también un aumento de presión que permanece hasta el final del experimento. El potencial redox está relacionado con el equilibrio de oxidación o pérdida de electrones y reducción o ganancia de electrones; en general (Cole, 1983), las aguas epilimnéticas oxigenadas tienen un potencial redox (E_7) en torno a 500 mV; en este caso (figura 4.45.) varía entre 300 y 370. En aguas anaerobias no es raro obtener valores negativos de potencial redox.

La C.E. del agua asciende hasta alcanzar 10 mS/cm al final del experimento; los mayores incrementos se producen los días 22 y 23/5/1999, a consecuencia de las altas temperaturas registradas.

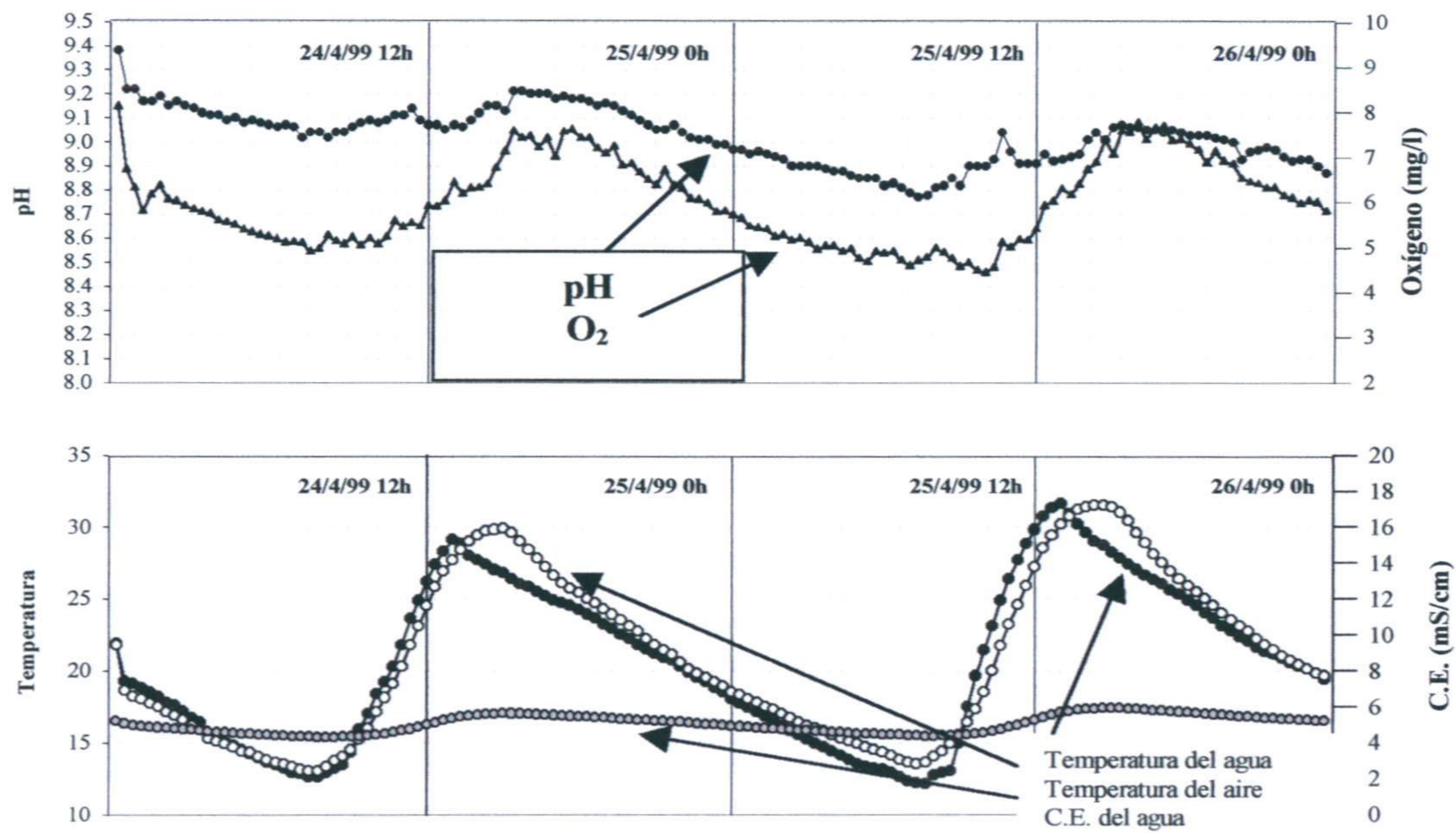


Figura 4.44. Evolución diaria de variables físico – químicas, del 24 al 26/4/1999

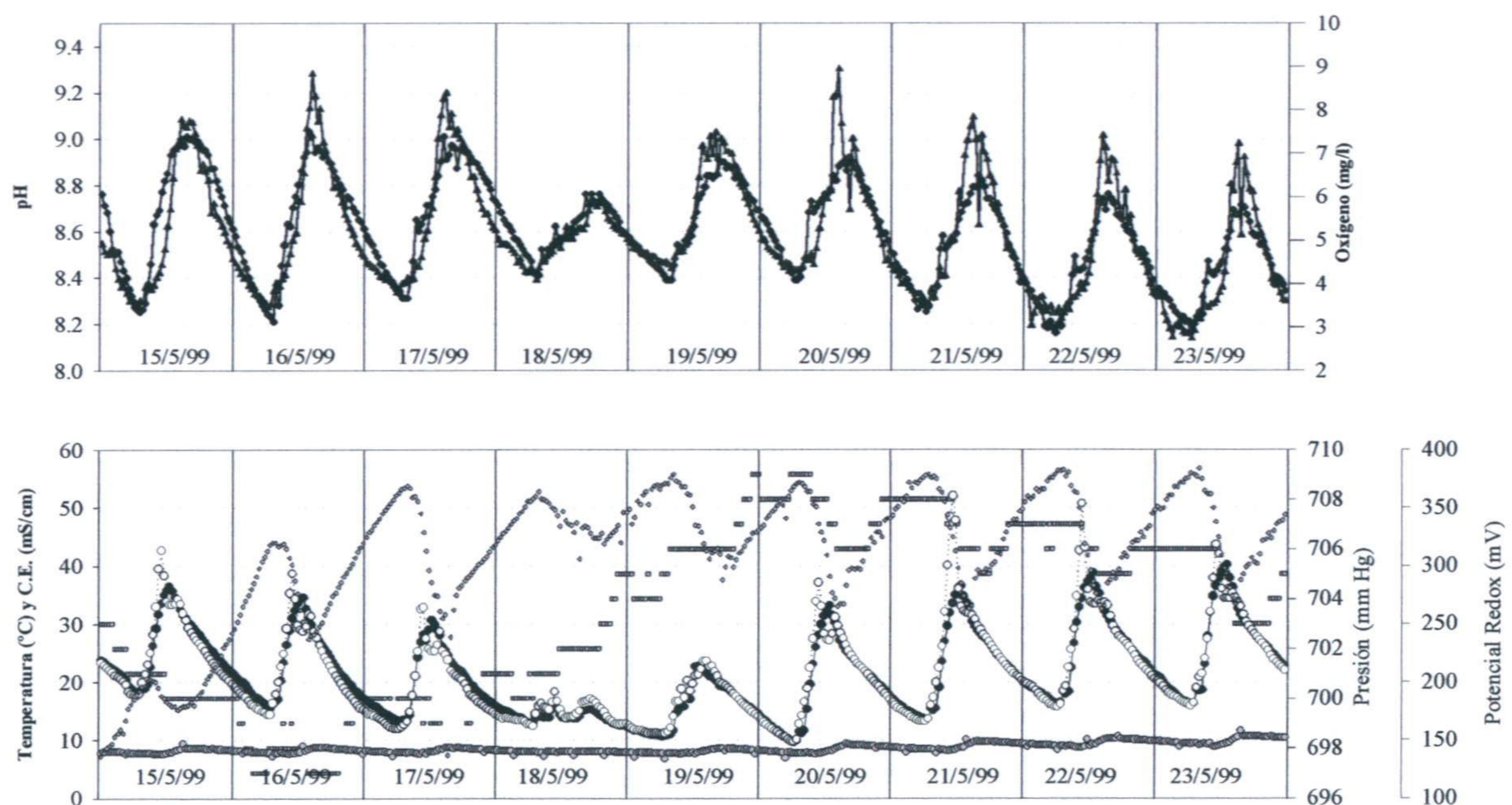


Figura 4.45. Evolución diaria de variables físico – químicas, del 15 al 23/5/1999

4.5. Metales pesados y pesticidas

4.5.1. Metales pesados

En la tabla 4.6. se pueden observar los valores medios de concentración de metales pesados en las aguas de las lagunas que se incluyen en este estudio. La sensibilidad del método de análisis de estos metales en las aguas de las lagunas Honda y Nueva fue menor, por lo que las concentraciones se expresan como inferiores al límite de detección de cada metal (100 µg/l para el cobre y el manganeso y 50 µg/l para el zinc).

Campillos	Cobre (µg/l)	Cinc (µg/l)	Manganeso (µg/l)
Dulce	3.05	18.75	299.25
Lobón	4.98	21.23	211.75
Salada	14.22	8.23	234.94
Redonda	9.05	9.83	708.28
Capacete	26.05	32.66	369.46
Cerero	3.40	9.40	151.88
Camuñas	6.00	91.47	432.52
Marcela	0.48	30.60	154.15
Fuente de Piedra			
Salinas	56.74	7.44	219.67
Vicaria	46.01	9.50	241.75
Archidona			
Grande	2.90	16.84	84.77
Chica	2.26	8.73	219.54
Antequera			
Caja	4.85	39.65	207.91
Viso	3.93	27.73	154.34
Ratosa			
Ratosa	3.94	18.91	170.73
Herr. Ladr.	16.39	25.49	166.91
D. Guadalhorce			
Mayor	6.67	18.74	671.42
Eucaliptal	2.11	10.03	458.47
Albuferas Adra			
Nueva	< 100	< 50	110.00
Honda	< 100	< 50	< 100

Tabla 4.6. Concentraciones medias (µg/l) de metales pesados en las aguas de las lagunas estudiadas (medias de las diez primeras campañas de muestreo)

Los metales pesados son elementos metálicos con peso atómico superior a 20 (peso atómico del calcio); generalmente estos elementos se encuentran en bajas concentraciones en aguas naturales y sus fuentes provienen de la meteorización de las rocas y de la contaminación antrópica.

En este estudio se han analizado los metales cobre, zinc y manganeso, y los resultados han puesto de manifiesto concentraciones bajas en la mayor parte de los casos. Los niveles medios citados en la bibliografía difieren para estos metales mucho de unos lugares a otros. La USEPA (1992) establece unos criterios de máxima

concentración en agua de mar para el cobre y el zinc, respectivamente, de 2.9 $\mu\text{g/l}$ y 95 $\mu\text{g/l}$. Según Meybeck (1990), las concentraciones medias usuales en agua de mar de estos metales son: Cu = 0.5 $\mu\text{g/l}$ y Zn = 2 $\mu\text{g/l}$ y en corrientes fluviales: Cu = 7 $\mu\text{g/l}$ y Zn = 30 $\mu\text{g/l}$. El manganeso es más abundante (está presente, por ejemplo, en calizas, areniscas, margas, etc.), y las concentraciones medias medidas en las aguas son mayores.

Las concentraciones medias de cobre calculadas han resultado ser altas en la laguna de Fuente de Piedra (56.7 $\mu\text{g/l}$) y las menores concentraciones medias se han registrado en la laguna del Eucaliptal (2.1 $\mu\text{g/l}$) y la laguna Chica de Archidona (2.2 $\mu\text{g/l}$). En las demás, los valores han oscilado en torno a los 5 – 10 $\mu\text{g/l}$.

Las concentraciones medias de zinc calculadas han resultado ser excepcionalmente altas en la laguna Camuñas (91.4 $\mu\text{g/l}$) y también en la laguna de Caja (39.6 $\mu\text{g/l}$) las menores concentraciones medias se han registrado en la laguna Chica, Salada, Redonda y Eucaliptal (en torno a los 8.5 $\mu\text{g/l}$). En las demás, los valores han oscilado en torno a los 20 $\mu\text{g/l}$.

Las concentraciones en manganeso superan sensiblemente a las de cobre y zinc debido a que su estructura atómica y propiedades son parecidas a las del magnesio, ion que abunda en la corteza continental.

Las mayores concentraciones medias de manganeso corresponden a las lagunas Redonda y Guadalhorce Mayor (en torno a los 650 $\mu\text{g/l}$) y en menor medida a las lagunas de Camuñas, Guadalhorce Eucaliptal y Capacete (400 $\mu\text{g/l}$). Las menores concentraciones medias se han registrado en la laguna Grande de Archidona (84.77 $\mu\text{g/l}$). En las demás, los valores han oscilado en torno a los 200 - 300 $\mu\text{g/l}$.

Para comprender el comportamiento de cualquier elemento traza en aguas naturales es esencial conocer la forma química en que se encuentre en el agua a analizar; en muchas ocasiones las concentraciones anormalmente elevadas se relacionan con la presencia en la solución de iones complejos estables (los metales pesados suelen encontrarse formando complejos con ligandos inorgánicos simples como el OH^- , el Cl^- , etc.). Por otra parte, los niveles máximos de concentración en general se deducen de la solubilidad de las fases que contengan a este elemento como constituyente mayoritario (generalmente un óxido o hidróxido, carbonato o sulfato). Finalmente, el fenómeno de la adsorción (fundamentalmente sobre oxidróxidos de hierro y manganeso) es probablemente la causa más importante de que los niveles medios medidos de estos elementos traza en los sistemas acuáticos se encuentren muy por debajo de los predichos en los cálculos de equilibrios de solubilidad.

4.5.2. Pesticidas

Los pesticidas analizados en las aguas de las lagunas de Málaga (que han sido cuatro: atrazina, lindano, metil-paratión y endosulfán) no han sido detectados en ninguna campaña, lo cual es indicativo del buen estado de conservación de las lagunas respecto a estos compuestos. Sin embargo, sería conveniente realizar estudios de más detalle ya que el comportamiento de los pesticidas en aguas de lagunas es difícil de

establecer. En función de la estructura química del pesticida (hay una gran variedad de tipos de molécula orgánica según sean organofosforados como el metil-paratión, organoclorados como el HCH, derivados de la triazínicos como la atrazina, etc.) pueden ser fotodisociados en poco tiempo, muchos de ellos son muy volátiles, etc. Por otra parte, se metabolizan dando lugar a compuestos que pueden ser incluso más tóxicos (metabolitos), pero que no se detectan como tales, ya que normalmente las técnicas analíticas se ponen a punto para el pesticida concreto y no para su metabolito.

Un estudio detallado habría de realizarse tras los momentos de adición de los pesticidas en los cultivos, ya que normalmente, en sistemas lagunares de este tipo, se producen incrementos puntuales en las concentraciones de determinados pesticidas, pero disminuyen en poco tiempo debido a los procesos explicados anteriormente. En aguas subterráneas, por desgracia, permanecen durante periodos más prolongados de tiempo, ya que las condiciones físico – químicas del medio no favorecen la degradación.

4.6. Análisis estadístico

Todas las técnicas de análisis multivariante indicadas en el apartado de materiales y métodos se han aplicado independientemente a las diez campañas de muestreo. Los resultados del análisis estadístico obtenidos han sido similares, si bien las diferencias en el total de sólidos disueltos fueron apreciables. Las figuras corresponden a los resultados obtenidos en la primera campaña (abril de 1997).

4.6.1 Análisis Factorial paramétrico exploratorio y Cluster por variables.

En primer lugar cabe destacar que en todos los casos la varianza explicada por los factores en el espacio de los datos se sitúa alrededor del 90% (tabla 4.7.). En segundo lugar se observa la repetición de muchos de estos factores en las distintas campañas, lo cual es indicativo de las características comunes que hay entre ellas. El primer factor es prácticamente común en todas las campañas y aún es más significativo el poder explicativo - corroborado después en el análisis cluster de los humedales - que posee, sobre todo si se compara con el del resto de factores. A la vista de los resultados de la tabla 4.7. puede asignarse una "etiqueta" explicativa para cada factor. Así, el factor 1 (explicado por las variables conductividad eléctrica, cloruros y sodio) representaría el efecto de la salinidad; el factor 2 se podría relacionar con la influencia del Trías Yesífero, ya que son el calcio, el magnesio y los sulfatos las variables que lo explican,

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Comunalidad estimada
Bicarbonat.	-0,0810452	0,0960499	0,109767	0,955857	0,941505
C.E.	0,916878	0,275058	0,0918347	-0,104439	0,935664
Calcio	0,111387	0,939048	0,0838055	-0,11664	0,914846
Cloruros	0,97105	0,0991756	-0,0308375	-0,0717694	0,958875
Fosfatos	-0,0475451	-0,1486	0,834081	0,379053	0,863714
Magnesio	0,4471	0,845131	-0,037335	0,0666656	0,919983
Potasio	0,013119	0,118064	0,946607	-0,107665	0,921767
Sodio	0,944045	0,225277	-0,0887164	0,0359487	0,951133
Sulfatos	0,16195	0,927463	-0,0590654	0,200409	0,930067

Tabla 4.7. Resultados del Análisis Factorial

el factor 3 es vinculable con efectos de contaminación antrópica (fosfatos y potasio) y el factor 4 como la influencia de materiales carbonatados.

De los dendrogramas obtenidos en el Análisis Cluster por variables, se obtiene prácticamente la misma asociación de variables que en el Análisis Factorial.

4.6.2. Análisis cluster por individuos, métodos jerárquicos.

A la vista de los dendrogramas obtenidos (figura 4.46.) se sugiere una partición entre 5,6 ó 7 clusters, pues 4 parecen insuficientes porque siempre aparecen 2 clusters unitarios.

En función de los resultados asociados a los posibles cortes, se ha optado por la configuración en 6 clusters. Hay que comentar también que la configuración en un número determinado de clusters se ha realizado para cada método seleccionado con el objeto de contrastar la solución dada por la selección promedio-ciudad. En la mayor parte de los casos se ha encontrado una semejanza importante, que se reafirma si se comparan las posibles soluciones de tipologías de 6 clusters mediante el coeficiente de Rand.

4.6.3. Análisis cluster no jerárquico.

Se ha observado que, siguiendo este método no jerárquico, independientemente de la solución inicial tomada, se establece la misma tipología de humedales para 6 grupos, lo cual confirma claramente la estabilidad de la solución. Estos grupos han resultado ser los siguientes:

Cluster 1: Camuñas; cluster 2: Capacete; cluster 3: Fuente de Piedra (1 y 2); cluster 4: Redonda, Salada y Guadalhorce; cluster 5: Chica, Grande, Marcela, Ratosa y Cerero; cluster 6: Dulce, Hoyos, Lobón, Viso y Caja.

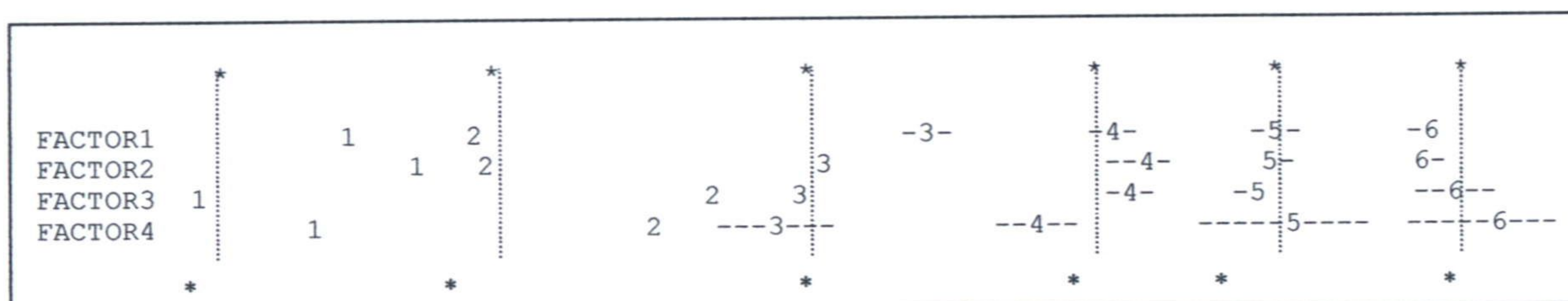
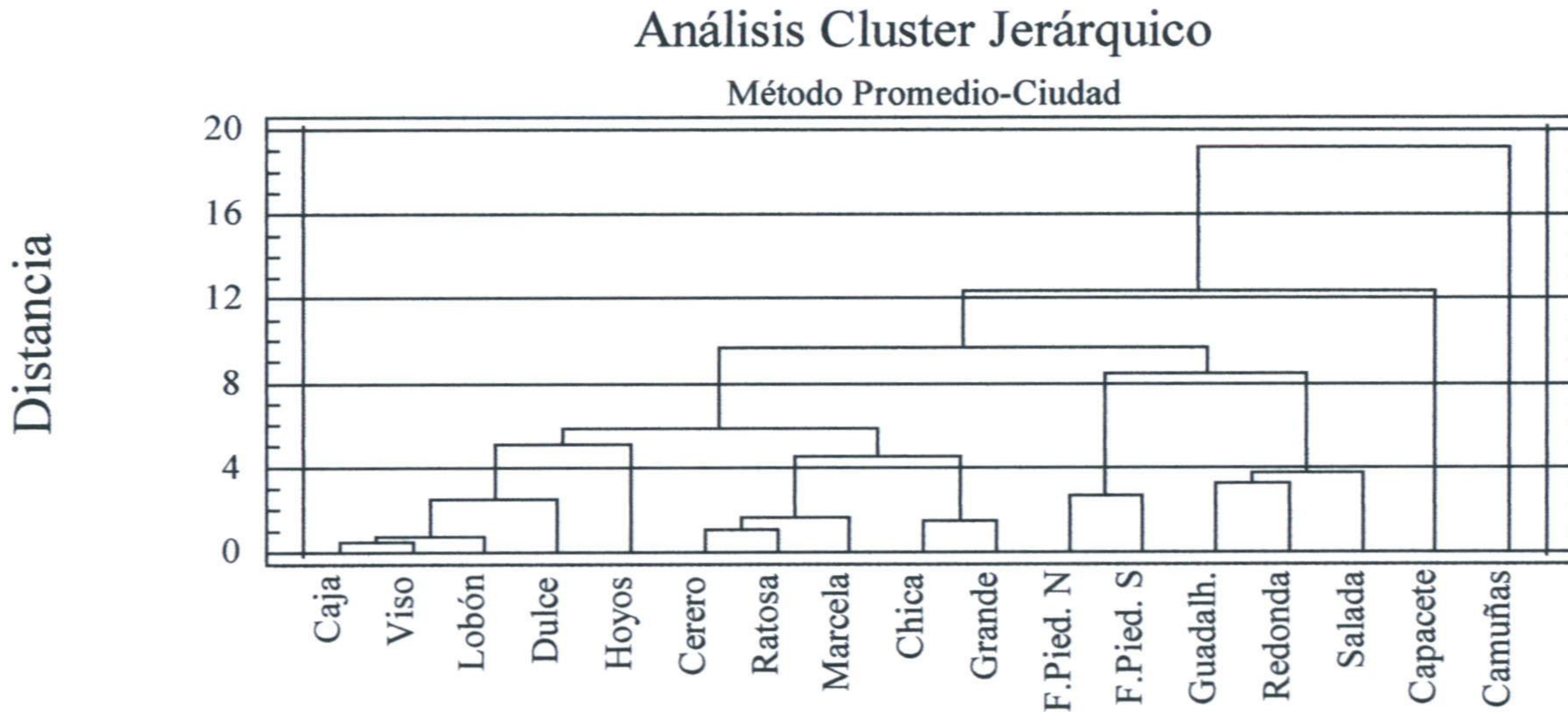


Tabla 4.7. Agrupaciones de Lagunas (6 agrupaciones) y grado de influencia de cada factor

tales grupos se pueden observar los valores medios que cada cluster toma sobre cada factor y compararlo con el valor medio que toma sobre toda la muestra, que es cero, puesto que los factores tienen media cero y varianza uno; el valor medio se representa gráficamente en la tabla 4.8. por la línea vertical de trazos. Con ello, valores alejados de dicha línea a la derecha indicarán en predominio de tal factor en dicho cluster, mientras que valores cercanos sugerirán lo contrario. Obviamente, para ello es necesario tener debidamente identificado cada factor en función de las variables que lo componen, como se ha indicado anteriormente; los trazos horizontales representan la varianza de cada factor en cada cluster.

La agrupación 1 (laguna de Camuñas) está fuertemente condicionada por el factor 2, influencia del triás yesífero, ya que esta laguna se sitúa sobre un afloramiento de esta naturaleza. El cluster 2 también está compuesto por un solo caso, la laguna de

Capacete; aquí el factor contaminación antrópica es el que más influye, lo cual está de acuerdo con la contaminación por purines que ha experimentado esta laguna;



actualmente el vertido ha cesado, pero el fósforo acumulado en el sedimento sigue influyendo en la hidroquímica de las aguas, eutrofizándolas. El cluster 3 consta igualmente de una laguna, la de Fuente de Piedra, y la variable fundamental es la salinidad (factor 1), ya que esta laguna está sometida a una intensa evaporación y bajo ella debe existir una salmuera freática (Benavente et al., 1993). Los restantes clusters no tienen un factor que predomine de manera patente, sino que, en general, es su similitud hidroquímica lo que los agrupa en una u otra tipología.

De acuerdo con los resultados obtenidos tras el análisis estadístico de los datos correspondientes a 9 variables físico - químicas registradas en las 16 lagunas consideradas a lo largo de las 10 campañas realizadas, en general no se han encontrado diferencias significativas en la configuración de los clusters de unas épocas a otras, si bien las concentraciones salinas experimentan variaciones importantes, debido tanto a la naturaleza del sustrato como al régimen hidrológico. Por otra parte, se observa como los clusters suelen contener lagunas pertenecientes a la misma Reserva Natural, salvo en el caso de las 8 lagunas de Campillos, las cuales se distribuyen en 5 de los 6 clusters que se observan. Este hecho se atribuye a la heterogeneidad de sustratos litológicos que forman las cuencas de estas lagunas, que condicionan en última instancia la hidroquímica de sus aguas. Así, por ejemplo, algunas están situadas sobre terrenos aluviales cuaternarios, como las lagunas Dulce y Lobón, que se agrupan con lagunas poco salinas, como Caja y Viso, otras están situadas sobre materiales triásicos clástico - salinos (Salada y Redonda), que se agrupan con lagunas costeras como la de la desembocadura del Guadalhorce. Por otra parte, las que poseen una mayor concentración de sulfatos y calcio (Marcela y Cerero) se sitúan sobre materiales triásicos clástico - salinos, y se agrupan con las lagunas de Archidona (Grande y Chica) que ocupan de hecho dolinas en el karst en yesos del Trías de Antequera (Pezzi, 1997).

5. Modelización

5.1. Introducción y objetivos de la modelización numérica

Habida cuenta del valor ecológico del sector de la Laguna de Fuente de Piedra, y el importante papel que juegan las aguas subterráneas en dicho sistema, es indudable el interés de conocer la evolución a largo plazo de este tipo de sistemas.

Ello exige modelizar la geometría de la interfase en el acuífero, aspecto que se ha abordado mediante modelización numérica bidimensional. El modelo que se ha utilizado debería permitir predecir si la salmuera constituye un sistema en equilibrio o si, por el contrario, la salinidad del agua se incrementará o disminuirá en el futuro.

Para la modelización es necesario asignar una determinada descarga salina del acuífero hacia la laguna lo cual permite comparar los resultados de la utilización de esta técnica con los de la aplicación de balances hídricos previos y determinar en última instancia si ambos resultados son coherentes.

Para aplicar dicho modelo se realizaron perfiles verticales de conductividad eléctrica del agua subterránea en los piezómetros localizados en las zonas próximas a la laguna. Con los datos obtenidos se elaboró un mapa de isoconductividades del agua subterránea con objeto de modelizar la posible evolución de la interfase agua dulce – agua salada en el tiempo, en una situación estacionaria y con condiciones de precipitación y evapotranspiración medias (ITGE, 1998).

Como paso previo se ha digitalizado la topografía superficial y la geometría del sustrato en el conjunto de la cuenca lo que, a su vez, ha permitido evaluar los volúmenes de agua involucrados y, por otra parte, elegir el sector más favorable para realizar la modelización bidimensional del flujo.

En el norte de la provincia de Málaga son frecuentes las aguas de elevada salinidad que suelen aparecer en dos situaciones hidrogeológicas diferentes. Una de ellas, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, es el flujo subterráneo a través de materiales evaporíticos triásicos (anhidrita, yeso y halita), lo que da lugar a manantiales salinos que en algunos casos deterioran sensiblemente la calidad de las aguas de los ríos (Carrasco, 1986; Benavente y Carrasco, 1985). El otro ámbito hidrológico en que aparecen salmueras corresponde a una serie de lagunas saladas que ocupan el interior de cuencas endorreicas (Benavente *et al.*, 1992). En este segundo caso la concentración evaporativa - debido al clima mediterráneo del área - es un factor primordial para que aguas de salinidad moderada puedan evolucionar en ciclos anuales hasta salmueras que, en los meses de verano, originan por desecación una costra salina. Asociadas con estas lagunas saladas estacionales existen salmueras freáticas que se identifican mediante sondeos de reconocimiento o a partir de captaciones destinadas a la obtención industrial de halita (Linares, 1990; Almécija, 1997). Existen, no obstante, ciertas diferencias hidroquímicas entre estos tipos de salmueras (Benavente *et al.*, 1986); en particular, el contenido en isótopos estables discrimina claramente a los manantiales salinos, cuya composición al respecto es típicamente meteórica, y las salmueras - libres o freáticas - asociadas a las lagunas, donde son patentes en mayor o menor grado evidencias de fraccionamiento isotópico debido a evaporación (Almécija, 1997).

En cualquier caso, cabe considerar que el origen geomorfológico de estas salmueras es común, por cuanto la karstificación de las evaporitas triásicas es la causa, por una parte, de la aparición de los manantiales salinos y, por otra parte, de la generación de las cuencas endorreicas a partir de las cuales existen las lagunas (Pezzi, 1977; Lhenaff, 1981; Durán y Molino, 1986). También sucede que, a la hora de analizar el origen de salmueras freáticas en relación espacial con lagunas saladas, los dos procesos antes mencionados (flujo a través de materiales evaporíticos y concentración evaporativa) pueden haber actuado conjuntamente, aunque la contribución de uno de los dos procesos puede ser predominante.

En particular, la cuestión anterior se plantea al analizar el caso de la laguna de Fuente de Piedra, la principal del área y una de las mayores de España. La hipótesis que se trata de analizar es que - admitiendo una serie de suposiciones que más adelante se detallarán - los aportes subterráneos a la laguna de aguas salinas debidas a la disolución de evaporitas en materiales triásicos pueden explicar la permanencia de una geometría del contacto agua dulce - salmuera freática que ha sido identificada experimentalmente. La cuenca de Fuente de Piedra (figura 5.1.) está situada sobre la divisoria atlántico - mediterránea (cuencas del Guadalquivir y del Sur de España, respectivamente).

La laguna de Fuente de Piedra es la zona principal de descarga subterránea; esta

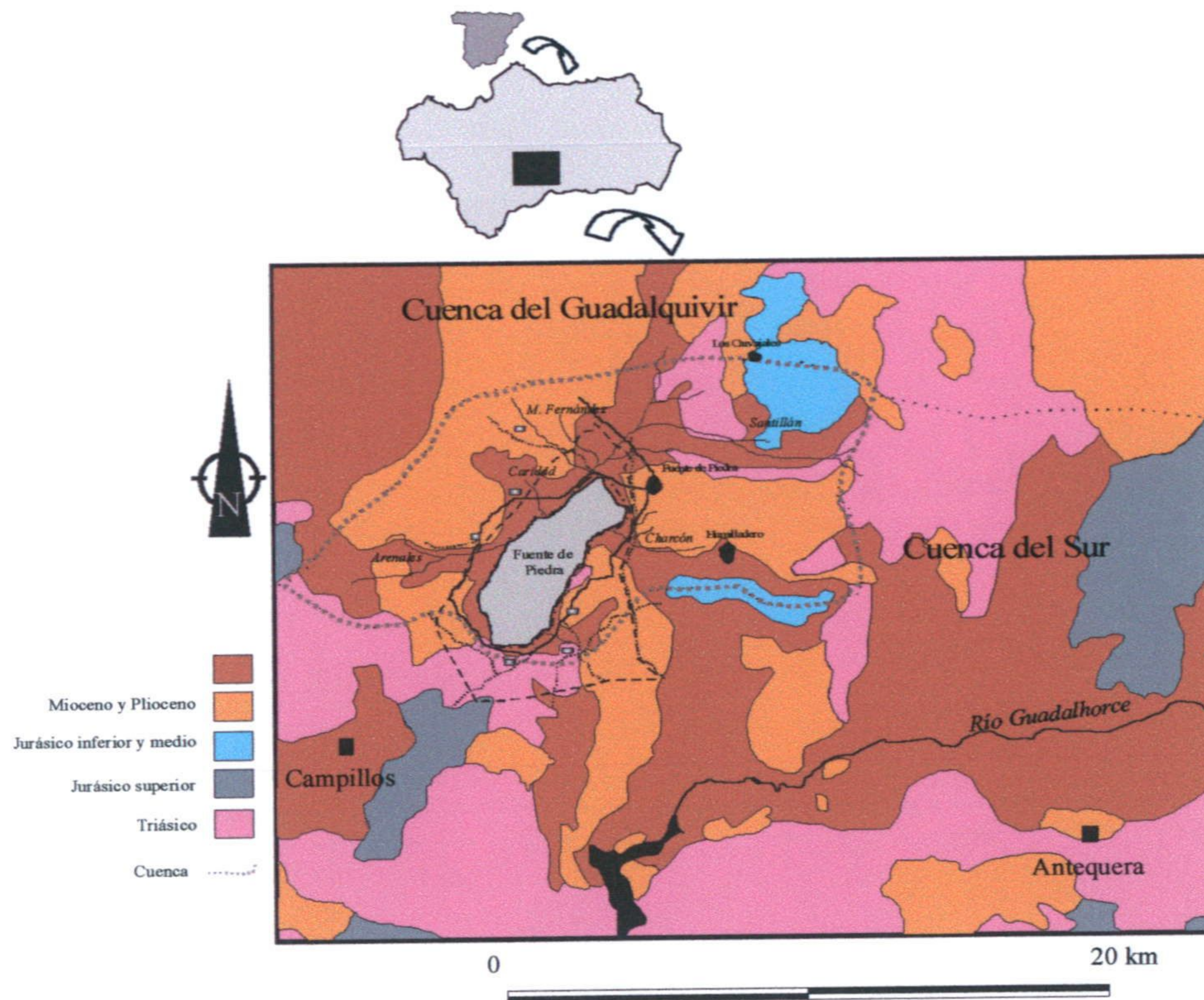


Figura 5.1. Cuenca endorreica de Fuente de Piedra

descarga, junto con las aportaciones superficiales procedentes de dos arroyos, el arroyo Santillán y el arroyo Charcón, constituyen la principal alimentación de la laguna. El carácter salino de los sedimentos triásicos es, junto con el clima de la región, el factor fundamental responsable de que las aguas de la laguna de Fuente de Piedra, así como el resto de lagunas de la región, posean una alta salinidad. Benavente (1996) describió una interfase bien definida en el acuífero de Fuente de Piedra, que separa una zona superior de agua dulce y poco densa de una más profunda con aguas más densas, cuya salinidad llega a alcanzar los 150 g/l. Esta interfase se halla próxima a la superficie en la orilla de la laguna y a mayor profundidad cuanto más lejos de la misma (figura 5.2.). Como ya se

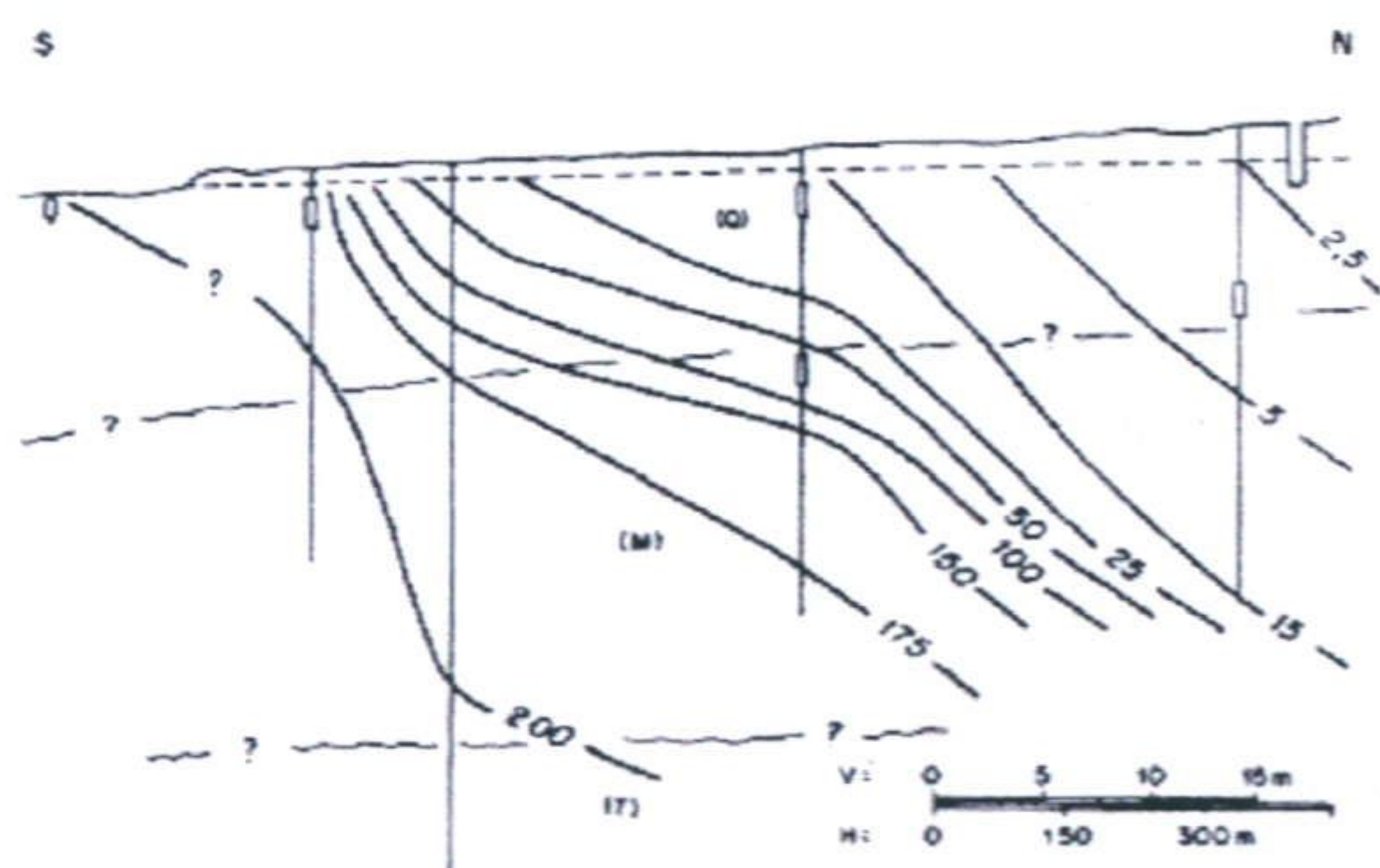


Figura 5.2. Sección del borde N de la laguna de Fuente de Piedra que muestra el perfil vertical de conductividad eléctrica del agua subterránea (mS/cm). Q: Cuaternario, M: Mioceno. (Modificado de Benavente et al., 1996)

ha comentado, la presencia de flujos subterráneos regionales de carácter salino que recargan la laguna de Fuente de Piedra es la hipótesis más verosímil para explicar la elevada salinidad de sus aguas, ya que los caudales superficiales aportados por los arroyos son de escasa cuantía y el agua de baja salinidad.

El balance hídrico del acuífero de Fuente de Piedra ha sido evaluado en diversos estudios previos, entre los que merecen ser resaltados los realizados por ITGE (1984) y Linares (1990), este último para el periodo 1962 - 1987. En todos los casos se considera que la descarga principal del sistema está representada por la evaporación de la laguna.

5.2. Metodología.

5.2.1. Modelo digital del terreno

Se ha realizado la discretización de la cuenca en una malla uniforme de nudos (en total 4548 nudos) a escala 1 : 50 000, con Surfer 7.0. Tomando como base dicha malla, se ha asignado cota topográfica a cada nudo; para ello se han utilizado mapas a escala 1 : 10 000 de toda la cuenca. La asignación de cotas del sustrato impermeable se ha basado en los datos previos disponibles (Linares, 1990; Almécija, 1997; ITGE 1998) y en el análisis de testigos de sondeos realizados en la zona de estudio; el sector en el que se encuentra el sustrato a mayor profundidad coincide con la parte central de la cuenca y la profundidad media del mismo es de 40 m aproximadamente (figura 5.3.); el espesor del acuífero es mayor en los sectores nordeste y sudeste (sierras de Molina y de Humilladero).

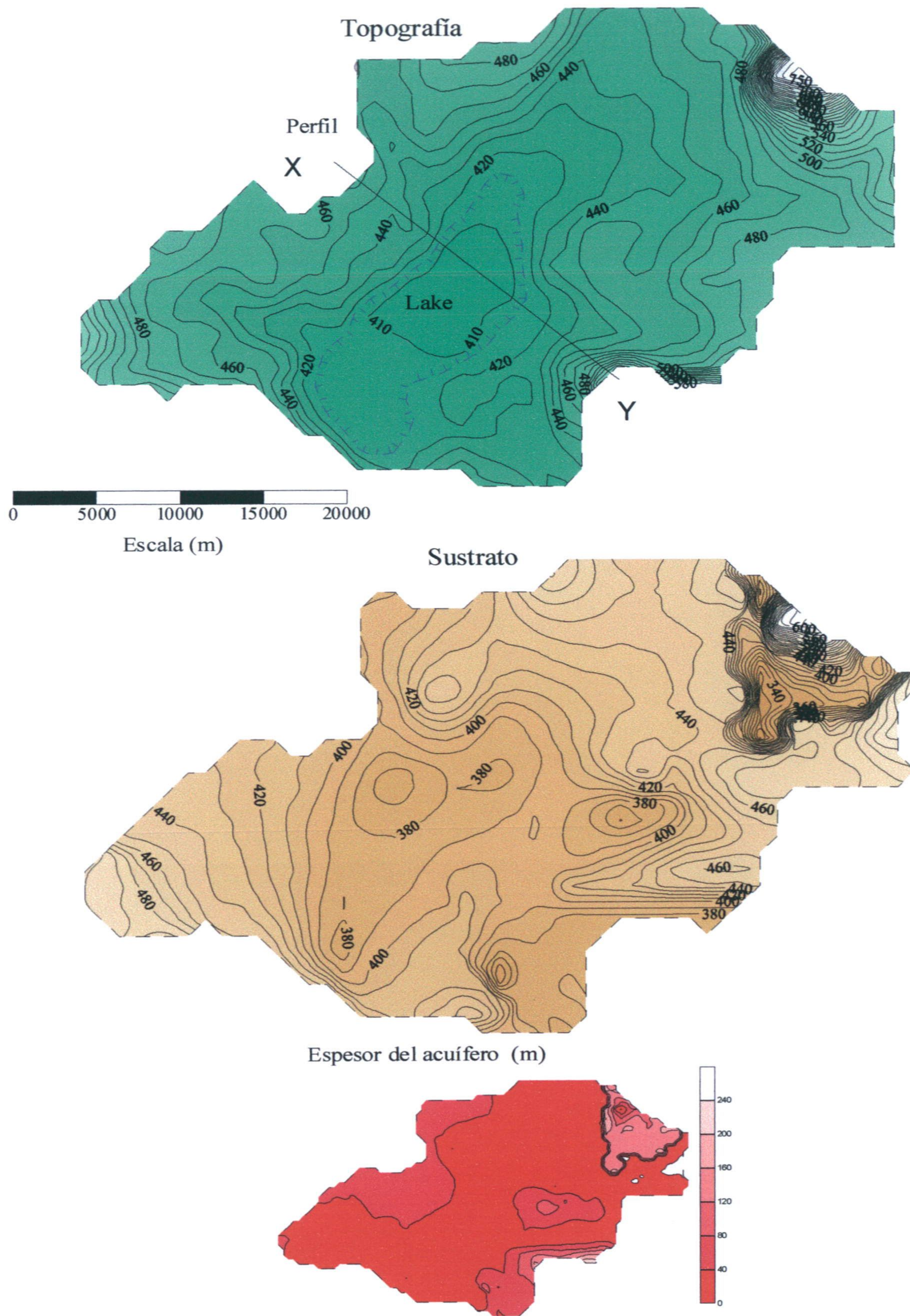


Figura 5.3. Morfometría de la cuenca de la laguna de Fuente de Piedra y dirección del perfil

5.2.2. Modelización de flujo y transporte de solutos

Para la modelización del flujo y transporte de solutos se ha utilizado el modelo MOC ("Two dimensional method-of-characteristics ground-water flow and transport model"), modelo en 2D de flujo subterráneo y transporte de solutos, desarrollado por el

USGS. Este modelo puede ser aplicado a problemas en una o dos dimensiones, tanto en régimen transitorio como estacionario. El modelo computa los cambios de concentración en el tiempo debido a procesos de advección, dispersión, mezcla o dilución, y a ciertas reacciones químicas (Konikow & Bredehoeft, 1978; Goode y Konikow, 1989). Integra la ecuación de flujo con la ecuación de transporte de solutos. El programa realiza una serie de iteraciones para resolver una aproximación en diferencias finitas a la ecuación del flujo subterráneo.

5.3. Aplicación del modelo al acuífero de Fuente de Piedra

La modelización se ha realizado en el corte transversal más apropiado en función de las características de la cuenca (figura 5.3.). Este corte representa una sección noroeste - sudeste de la cuenca de la laguna, aproximadamente desde el "Cortijo Las Rosas", al noroeste, hasta el "Cortijo de San Pedro", al sudeste.

Las características del mallado utilizado en el modelo son las siguientes: en el eje horizontal, a escala 1:12500, se situaron 77 nudos separados entre sí por una distancia de 100 m (longitud horizontal del corte 7.7 km) y en el eje vertical, a escala 1:500, se eligieron 20 nudos, con distancias entre ellos de 5 m (longitud total del perfil 100 m).

El modelo hidrodinámico en régimen estacionario considera una anisotropía (relación k_v/k_h) en los materiales acuíferos de la cuenca de 0,05. Se han considerado dos valores diferentes de permeabilidad para dos tipos distintos de materiales.

- a) se ha asignado una conductividad hidráulica de $2 \cdot 10^{-3}$ m/d a los materiales cuaternarios, que representan los depósitos superficiales en la mayor parte del perfil, que se sitúa cerca de los arroyos que desembocan en la laguna, tanto por el sudeste (arroyo Charcón), como por el noroeste (arroyo Santillán) y
- b) se ha aceptado un valor de $3.6 \cdot 10^{-3}$ m/d para la conductividad hidráulica de los materiales miocenos, que constituyen la mayor parte del acuífero (Linares, 1990).

Los valores asignados a otros parámetros también requeridos por el modelo han sido: 35% para la porosidad efectiva, de acuerdo con los datos de Linares (1990) y 0.3048 m para el coeficiente de dispersión. El modelo no considera la difusión como un parámetro independiente, pero el coeficiente de dispersión (en realidad denominado *dispersión hidrodinámica*), engloba la dispersión mecánica y la difusión. La razón entre dispersión transversal y longitudinal es del 30%.

En el modelo hidrodinámico se han establecido las siguientes condiciones en los límites:

- a) se ha considerado una recarga neta, homogénea en superficie, con un valor medio de 73 mm/año, de acuerdo con los datos correspondientes tomados de ITGE (1998);
- b) se ha supuesto que esta recarga corresponde a agua dulce, lo que se ha traducido en asignarle una salinidad nula (0 g/l);
- c) en cada una de las simulaciones (figura 5.4.) se ha aceptado la existencia de una recarga profunda, con agua de alta salinidad (150 g/l);
- d) la descarga del sistema se produce por evaporación directa desde la superficie del agua libre de la laguna;
- e) se ha considerado constante el nivel de la laguna, condición impuesta por el modelo y que sólo debe ser aceptada cuando consideramos horizontes temporales lo suficientemente largos, como es el caso de esta investigación.

5.4. Resultados de la simulación numérica de la recarga salina profunda en la laguna de Fuente de Piedra

De acuerdo con los mapas topográfico y del sustrato realizados en este trabajo, y como se ha señalado en el apartado anterior, el espesor medio del acuífero de Fuente de Piedra es de, aproximadamente, 50 m, valor aceptado en la mayor parte de los trabajos realizados en el área (Linares, 1990; Almécija, 1997; ITGE, 1998). Con el mallado utilizado se obtiene un volumen total de materiales de 5179 hm³, de los cuales están saturados aproximadamente 2920 hm³ (se acepta un valor medio para el nivel piezométrico de 440 m snm)

El volumen de reservas que resulta de dicho cálculo, teniendo en cuenta el valor de la porosidad eficaz, es de 116 hm³, coincidente con el estimado en trabajos previos: por ejemplo en el trabajo realizado por el ITGE (1998) dicho valor fue evaluado entre

SIMULACIÓN 1



SIMULACIÓN 2



SIMULACIÓN 3



Figura 5.4. Condiciones de las tres simulaciones realizadas

100 y 160 hm³. En todo caso, es necesario tener en cuenta que sólo una parte de estas reservas pueden considerarse útiles para la agricultura, dado que el contenido salino del agua aumenta rápidamente en profundidad, como se comenta a continuación.

En la figura 5.5. se pueden observar los resultados relativos a la modelización de la interfase agua dulce - agua salada y los niveles piezométricos en la laguna de Fuente de Piedra. Se han representado 3 de las 10 etapas consideradas para cada simulación. En la etapa inicial (T = 100 años) se considera que todo el acuífero está saturado con la salmuera freática, y en las subsiguientes etapas se puede observar la evolución de esta salmuera para comprobar la estabilidad o inestabilidad del sistema en

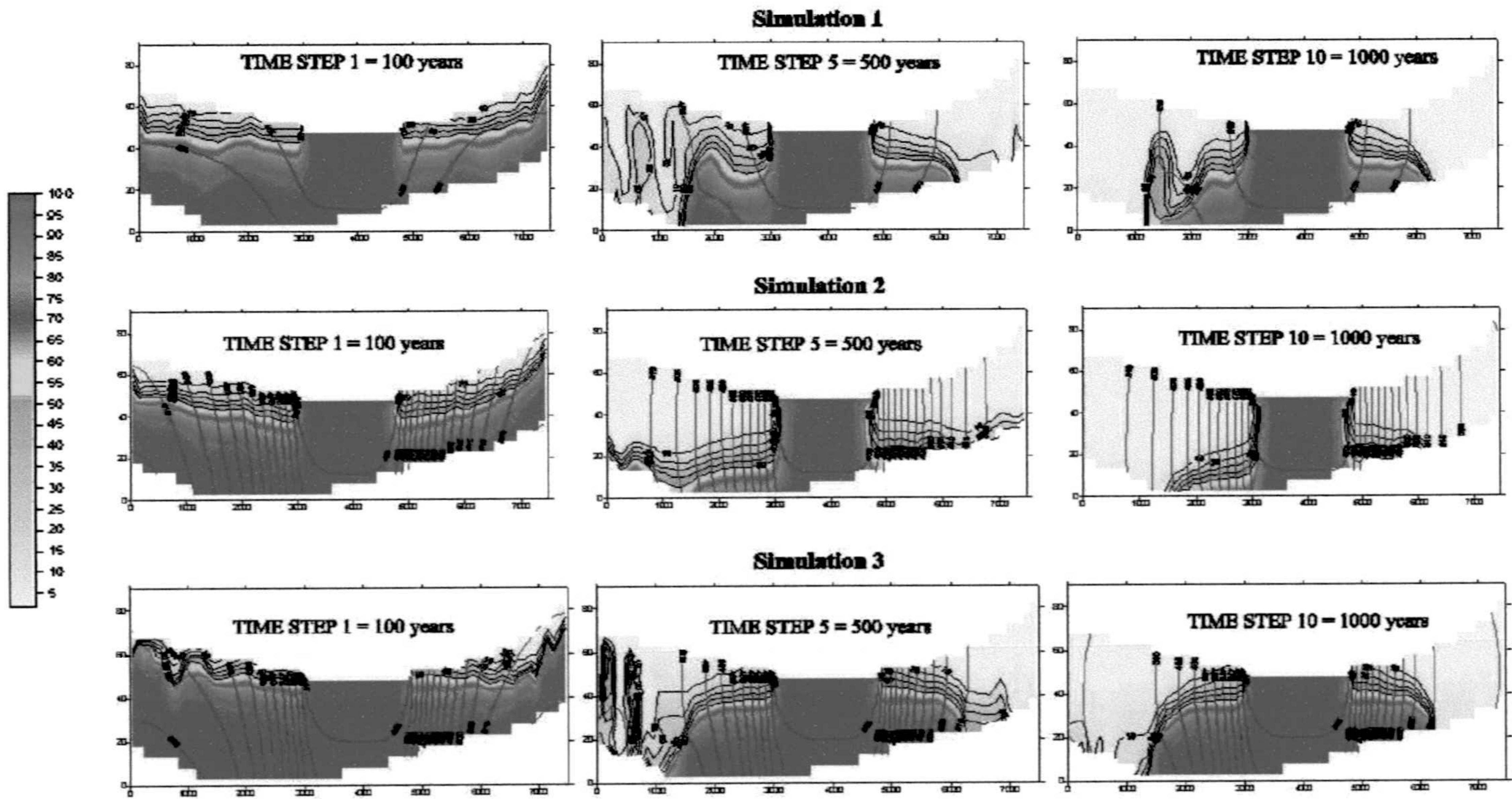


Figura 5.5. Perfiles verticales de concentración (% máxima concentración = 150 g/l, menos del 50% en escala de grises) y niveles piezométricos en el corte X-Y. Resultados para las tres condiciones de simulación.

un horizonte temporal suficientemente largo (1000 años). En las tres simulaciones se han considerado diferentes volúmenes de recarga profunda (figura 5.4.) y un mismo valor para la recarga superficial.

Tan sólo en el segundo caso (simulación 2) el sistema no sería estable en el horizonte temporal propuesto, ya que la recarga por agua dulce lavaría las sales del sustrato evaporítico triásico y la interfase se situaría inmediatamente bajo la laguna, que seguiría siendo salina; en el resto de la cuenca, sin embargo, el agua sería dulce hasta el sustrato impermeable del acuífero, lo cual es poco concordante con la situación real. En esta simulación la recarga profunda se supuso de igual cuantía que la recarga superficial (recarga profunda 1X recarga superficial), lo cual hace pensar que la primera debe ser mayor que la segunda, para que esta situación de lavado en toda la cuenca no se produzca. El tercer caso es el que considera una mayor recarga profunda, 10 veces superior a la recarga superficial bajo la laguna (10X) y de 5 veces mayor (5X) en franjas de 1,5 km de largo en ambos laterales de la laguna. En esta simulación la interfase se sitúa a 400 m s.n.m., y es demasiado extensa en la horizontal, es decir, la interfase está cerca de la superficie en zonas muy distales del centro de la cuenca. En el primer caso se ha considerado una recarga profunda 5X la recarga superficial, y de 2,5X en los

laterales. Si bien se observan algunas anomalías en la interfase en el borde izquierdo del perfil, los resultados de esta simulación son lo que más se asemejan al estado real, lo que sugiere la existencia de una recarga de la laguna con aportaciones de flujos profundos de elevada salinidad procedentes de la disolución de los materiales salinos que abundan en el sustrato geológico triásico de esta región. Esta situación da lugar a la existencia de una interfase bien definida en la cuenca de la laguna, situada a poca profundidad en las cercanías de la orilla. El hecho de que existan anomalías de pequeña magnitud en este comportamiento general puede ser debido a la heterogeneidad en la litología del sustrato triásico, en el que pueden existir domos salinos en profundidad que confieran una mayor salinidad local.

Mediante la utilización del modelo MOC se ha podido, pues, establecer la geometría de la interfase agua dulce - salmuera freática para un periodo de 1 000 años, y así los resultados obtenidos sugieren que las condiciones actuales del sistema estudiado son estables en el tiempo. Por otra parte, se han obtenido valores de aproximadamente $10 \text{ hm}^3/\text{año}$ para la recarga salina profunda, lo cual es coherente con los balances hídricos realizados anteriormente en el acuífero y, así, se verifica parcialmente la utilización de este modelo.

6. CALIDAD AMBIENTAL DE LOS HUMEDALES ESTUDIADOS

6.1. Factores de tensión que afectan al medio

Hay diversos factores que afectan a la calidad y extensión de las zonas húmedas estudiadas: el turismo, la caza, extracciones de agua, etc., pero es la utilización de sus vasos con fines agrícolas lo que ha degradado en mayor medida estos sistemas, por lo que las lagunas menos saladas son las que han sufrido una mayor degradación, porque son las que ofrecen posibilidad de cultivo en su vaso. La transformación del terreno para usos agrícolas también ha provocado la desaparición o la alteración de algunas áreas encharcables, sobre todo en el entorno de Fuente de Piedra; cabe citar la zona de "Las Albinas" al norte o "Cantarranas" al oeste (Rendón, 1996).

Zona de protección. Las lagunas de Caja y Viso no se encuentran protegidas y sus características ecológicas las configuran como dos espacios de un gran valor ambiental, sometidos a presión antrópica fundamentalmente debida al lixiviado de los fertilizantes y pesticidas suministrados a los cultivos de nogales que rodean las cuencas vertientes de las lagunas.

El Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce está sometido a una gran presión antrópica por estar situado dentro del casco urbano de la ciudad de Málaga; su zona de protección debería ser ampliada.

Las albuferas de Adra son los dos sistemas acuáticos que se incluyen en este estudio con una mayor alteración de sus cuencas vertientes, debido al cultivo en invernaderos cuyos límites llegan al borde mismo de las lagunas. Este es el motivo por el cual, con fondos del Programa LIFE, recientemente se han comprado dos parcelas de terreno que totalizan una extensión de 12670 m². Estas parcelas están situadas entre las dos albuferas y en ellas se prevé retirar el suelo arenoso, añadido para el cultivo bajo plásticos y restaurar la vegetación primitiva de la zona (Paracuellos, M., *com. pers.*)

Propiedad. En la zona de Campillos, las lagunas Dulce y Salada son propiedad del Ayuntamiento; sin embargo, el resto son de propiedad privada, por lo que puede haber problemas para la gestión que, en todo caso, debiera hacerse integrada con la de las lagunas de Fuente de Piedra (que fue comprada por el antiguo ICONA) y la Ratosa.

Las lagunas de Archidona y las de Caja y Viso son también propiedad privada e igualmente podría haber algunas dificultades con la gestión de estos espacios, fundamentalmente en las dos últimas, por los problemas comentados anteriormente, derivados de su categoría, sin proteger.

En el caso de las albuferas de Adra se tiene prevista la compra paulatina de los invernaderos que las rodean, aunque estos terrenos son muy caros y el proceso será lento. La adquisición de las dos parcelas comentadas anteriormente es, sin embargo, un primer paso en este sentido.

Turismo. Las lagunas que soportan una mayor presión turística son la de Fuente de Piedra y las de Archidona, sobre todo la laguna Grande. Esta presión es, sin embargo, poco importante y se limita a visitas durante los fines de semana de grupos y familias (en la laguna de Fuente de Piedra) y a actividades de acampada libre (prohibidas en las



Figura 6.1. Vista parcial de la caseta de observación de aves instalada en la laguna Dulce de Campillos (abril 1997)

Reservas Naturales) y de comidas familiares los días de fiesta en la laguna Grande. En ocasiones se ha

practicado la pesca ilegal en esta laguna, lo cual debiera ser más intensamente vigilado por los servicios de guardería forestal y por el SEPRONA. No parece que las lagunas de Campillos sean visitadas con mucha asiduidad, pero hay que tener en cuenta que algunas como Dulce y Capacete se encuentran muy cerca de carreteras, por lo que pueden constituir un atractivo para visitantes que requiere ser regulado. Quizás debiera acometerse el cercado de estas dos lagunas para evitar que los visitantes puedan acceder a la orilla. Sin embargo, en las propias carreteras se podrían instalar puntos de observación que permitieran aprovechar el potencial recreativo y educativo que pueden tener, lo cual se ha realizado recientemente en la laguna Dulce.



Figura 6.2. Laguna de Cerero rodeada de cultivos, foto tomada desde el cerro Romeroso (julio 1997)

Extracciones de agua. Las lagunas de Antequera, Caja y Viso, por su baja salinidad, han sido y son utilizadas para la extracción de aguas para riego. Algunas de las lagunas de Campillos (Camuñas, Lobón, Marcela) han sido parcialmente drenadas para utilizar el vaso para cultivo o bien para aprovechar las aguas para riego (Camuñas); en el resto de las lagunas no se ha constatado dicha actividad.

La extracción de agua subterránea es relativamente importante en la cuenca de Fuente de Piedra; hay aproximadamente 200 captaciones con equipo de bombeo y otras tantas sin él (Rendón, 1996). La localización de los sondeos y pozos se concentra al noreste de la laguna y en las cercanías de Humilladero (Linares, 1991).

Agricultura. Las cuencas de todos los complejos lagunares del estudio, salvo la laguna Grande de Archidona, están intensamente cultivados con cultivos de secano, tanto de olivar como de cereales y girasol, que han invadido, en la mayoría de las lagunas, la orla de vegetación litoral. Además, los agricultores han acumulado en los bordes de las cubetas y en los mismos vasos las piedras que extraen de los campos cultivados (Redonda, Camuñas, Salada, Cerero, Lobón). Los nutrientes lavados de estos terrenos de cultivos están afectando a varias de las lagunas (Dulce, Salada y, muy posiblemente, Caja y Viso), que manifiestan procesos de eutrofización. Se ha constatado además quema y roturación de la orla vegetal (Salada, Marcela, Dulce). La extensa plantación de nogales en los terrenos que rodean a las lagunas de Caja y Viso está siendo fertilizada y tratada con compuestos xenobióticos específicos que, aunque no se han detectado en los análisis de pesticidas realizados, podrían contaminar las aguas de estas lagunas.

Pastoreo. Aunque la actividad ganadera no está muy desarrollada, hay una cabaña de ovino y caprino que, probablemente, es mayor de lo que estos sistemas ya muy degradados pueden soportar. Concretamente, en la laguna de Lobón, los rebaños de ovejas pastan y descansan en la orilla misma de la laguna, contribuyendo así al aumento de la concentración en el agua de la laguna de nutrientes que provienen del lixiviado de las heces. El pequeño tamaño de esta laguna la hace ser más sensible a este tipo de impacto.

Caza. Todas las Reservas Naturales estudiadas se encuentran incluidas dentro de cotos de caza. Además, existe caza incontrolada que puede afectar a las comunidades de vertebrados. En este caso el riesgo para la fauna es mayor, por la presencia de un importante número de aves que pueden incitar a su práctica. Se debería proceder a la segregación oficial de las áreas protegidas de los cotos en los que están incluidas. Además, es imprescindible proceder al deslinde de la zona, con la señalización correspondiente de prohibición de caza.

Contaminación por vertidos líquidos. Aunque parece actualmente eliminada, la laguna de Capacete ha sufrido el aporte de los vertidos líquidos (purines) altamente contaminantes de la granja de cerdos próxima. Sería deseable mantener una vigilancia estrecha en la zona para que esto no vuelva a suceder. La laguna de Fuente de Piedra recibe, por los arroyos Santillán y del Charcón, los residuos líquidos (aguas residuales) de pueblos próximos (tales como Humilladero). Aunque el canal perimetral actúa como freno de dicha contaminación hacia la laguna, evidentemente se producen en la desembocadura de estos afluentes temporales episodios de contaminación importantes que alteran el "pool" de nutrientes en estos sectores. Estos residuos líquidos deberían de ser depurados para no alterar el equilibrio trófico de la laguna.

Contaminación por vertidos sólidos. Como se ha comentado en apartados anteriores, el vaso de varias de estas lagunas ha servido para la acumulación de escombros de variado origen: piedras retiradas de los campos de cultivo, restos de construcción de viviendas y de la construcción de carreteras y caminos que, en algún caso, han acabado

con lagunas existentes (Redonda) y siempre han ejercido un efecto destructivo en la orla de vegetación litoral.

Eutrofización. Se conoce por eutrofización el proceso por el que aumenta la fertilidad de las aguas como consecuencia del aporte de nutrientes: nitrógeno y, sobre todo, fósforo. Este enriquecimiento tiene como consecuencia un crecimiento masivo de algas, especialmente del fitoplancton, que compite con el fitobentos en la captación de nutrientes. La consecuencia final es un empobrecimiento de la calidad del agua, que determina la desaparición de muchas especies exigentes, que son sustituidas por unas pocas especies muy tolerantes. Es decir, hay un descenso de la diversidad biótica del sistema y una pérdida de estructura; el comportamiento de los ecosistemas acuáticos frente a este enriquecimiento difiere según sea la profundidad de la cubeta. Las lagunas



Figura 6.3. Laguna Redonda con vertidos de escombros (mayo 1997). Actualmente la laguna ha sido restaurada (ver figura 6.5.) y los escombros retirados

poco profundas son naturalmente eutróficas, ya que tienen una gran dependencia de los sistemas terrestres adyacentes y, además, la recirculación de nutrientes hacia la columna de agua a partir de los sedimentos es constante, por la turbulencia creada por los vientos. No obstante, si no hay un impacto antrópico, esta productividad se canaliza hacia el bentos, de modo que se desarrollan praderas de macrófitos, colonizadas por algas bentónicas, y permanecen las aguas claras y limpias. Sólo cuando mueren los macrófitos, al final de su periodo vegetativo (verano), vierten sus nutrientes en el agua y ésta se coloniza con fitoplancton.

Pero si en estos sistemas hay un aporte externo de nutrientes por actividades antrópicas, la productividad se canaliza hacia el plancton (mucho más oportunista) que, al crecer desmesuradamente, limita la llegada de luz al fondo y, por lo tanto, la implantación de macrófitos. En este caso se puede producir déficit de oxígeno e, incluso, anoxia, por lo menos durante la noche, lo que afecta a la vida de numerosos invertebrados.

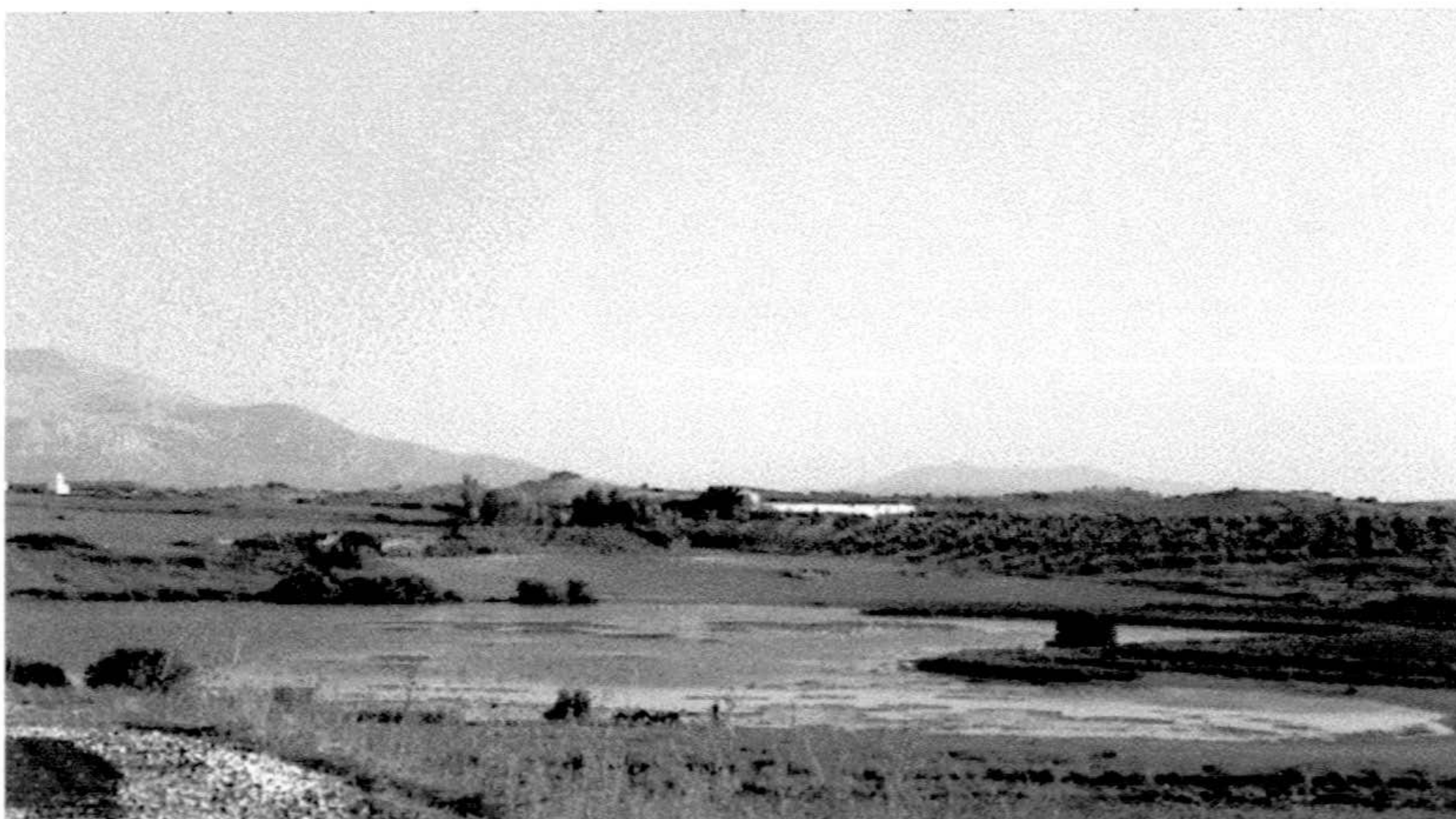


Figura 6.4. Laguna de Capacete (octubre 1997), se aprecian los tapetes de cianofíceas aflorando. Esta laguna se ha usado como cuenca receptora de los vertidos líquidos (purines) de la granja de cerdos que se observa al fondo.

En el complejo lagunar de Campillos se ha observado una tendencia a la eutrofización, por lo menos en las lagunas Dulce (por abonos) y Salada (por abonos y vertidos de escombros). Además, se ha detectado hipereutrofia en la laguna de Capacete; aunque en esta última los vertidos han desaparecido, la carga de materia orgánica y nutrientes que aún tienen los sedimentos permite prever el mantenimiento de condiciones muy eutróficas durante bastantes años, hasta que la autodepuración natural del sistema permita recuperar las condiciones naturales. Las lagunas costeras: Honda y Nueva de Adra y el complejo lagunar de la desembocadura del Guadalhorce son los sistemas más eutróficos de los estudiados.

En el resto de las lagunas no se han observado condiciones especialmente alarmantes de eutrofización y, en cualquier caso, la eutrofización antrópica es difícil de cuantificar en estas lagunas someras que son eutróficas de forma natural.

En las lagunas profundas (Grande y Chica) no se ha detectado impacto por el lixiviado de fertilizantes, pero su estado también es eutrófico.

Grandes obras de infraestructura: La carretera de circunvalación de Campillos, una vez finalizada, no ha sido, en principio, un elemento de tensión en la Reserva. Por fin se efectuó la retirada de escombros de la laguna Redonda, para intentar conseguir su recuperación.



Figura 6.5. Obras de retirada de escombros en la laguna Redonda (mayo 2000).

6.2. Diagnóstico de la calidad ambiental

Los sistemas palustres de la provincia de Málaga presentan diferentes grados de alteración de las condiciones ambientales naturales. Hay sistemas relativamente bien conservados, en los cuales las actividades antrópicas no han modificado sensiblemente ni la calidad de las aguas ni las comunidades que las colonizan. En otras ocasiones las condiciones ambientales se han visto tan alteradas que sistemas con un valor ecológico potencial elevado se encuentran en la actualidad tan degradados que, para su recuperación, habría que realizar actuaciones de restauración importantes.

Estas alteraciones han sido causadas sobre todo por la agricultura y por la realización de obras de infraestructura, tales como carreteras. Muchas de las conclusiones que se recogen en este apartado (fundamentalmente las que se refieren a las lagunas de

Campillos) se han basado en el *Plan de Ordenación de Recursos Naturales de la Reserva Natural Lagunas de Campillos*.

El estado ambiental actual de las distintas lagunas estudiadas es el siguiente:

Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra: El sistema se encuentra degradado por la actividad antrópica. La cubeta de la laguna de Fuente de Piedra ha sido modificada en diversas ocasiones, aunque la mayor transformación se produjo al iniciarse la explotación salinera de la laguna; para ello se construyeron diferentes estanques de evaporación, que se distinguen todavía si los niveles de agua son bajos, se construyó el canal perimetral y, en definitiva, se modificó la topografía de la cubeta. La contaminación puntual debida a aguas residuales es uno de los mayores impactos que afecta a la laguna.

Reserva Natural Laguna de la Ratosa: Esta laguna se encuentra relativamente poco degradada por la actividad antrópica. Se encuentra rodeada de cultivos de olivos, que representan el único factor de presión digno de consideración



Figura 6.6. Estanques de evaporación de la antigua instalación salinera en la laguna de Fuente de Piedra (ITGE, 1998)

Reserva Natural Lagunas de Campillos: Las lagunas de Campillos se encuentran bastante degradadas por la actividad antrópica. Su estructura natural está afectada por varias actuaciones: desecaciones (para aprovechar los suelos o para utilizar las aguas para riego); destrucción por cortas, incendios y gradeos de la orla de vegetación natural; vertidos de escombros en las cubetas y contaminación de las aguas con vertidos agropecuarios. La incidencia de todos estos impactos es variable de unas a otras lagunas, pero en todas ellas se ha modificado su funcionamiento. Los cambios más importantes detectados en cada laguna son los siguientes:

Laguna Dulce: Según el catálogo de Pardo (1948), esta laguna era permanente. Actualmente se llena los años de pluviometría superior a la media. Esta laguna se ha drenado en gran parte para aprovecharla para cultivo y se han construido acequias que han eliminado entradas superficiales. Esta disminución de la cantidad de agua y la mayor relación evaporación / precipitación que ahora experimenta están provocando un progresivo aumento de la salinidad media del agua.

Laguna Salada: Todo el borde de la laguna se ha utilizado para verter escombros, por lo que ha desaparecido prácticamente toda la vegetación litoral. Además, se ha arado y tratado de cultivar hasta el borde mismo del cinturón de escombros. Uno y otro impacto han determinado un enriquecimiento de las aguas en nutrientes, que favorece el desarrollo masivo del fitoplancton (eutrofización progresiva), que, sin duda, puede afectar a la comunidad macrofítica, que cuenta como elemento muy importante a la especie *Althenia orientalis*.



Figura 6.7. Laguna Salada (julio 1997)

Laguna Camuñas: Existe un canal de drenaje cuyo funcionamiento sólo permite una pequeña inundación en los años más lluviosos. Al permanecer varios años seca, la vegetación terrestre la está invadiendo

Laguna Capacete: Esta laguna es calificada de permanente en el catálogo de Pardo (1948) y de hecho lo ha sido hasta fecha reciente. Es posible que la permanencia de las aguas fuera en parte artificial, ya que esta laguna se ha usado hasta fechas recientes como cuenca receptora de los vertidos líquidos de la granja de cerdos próxima. Esto provocó que los equilibrios ecológicos naturales se modificaran; una gran contaminación orgánica determinó que el agua de la laguna fuera prácticamente anóxica, favoreciendo la proliferación de bacterias fotosintéticas del azufre, lo que le daba coloración roja durante parte del año y cianobacterias en superficie (figura 6.4.). En estas condiciones prácticamente ningún animal acuático podía sobrevivir. Actualmente, y tras el cese de los vertidos, las aguas siguen teniendo una alta concentración de ortofosfato, aunque se prevé que con el tiempo el sistema se autodepure, como ya se ha comentado.

Reserva Natural Lagunas de Archidona: El único factor de impacto en estos espacios protegidos es la presión turística. Está prohibido acampar, pescar, bañarse etc. en la zona de protección de las lagunas, aunque estas actividades podrían seguir realizándose de no intensificarse los servicios de vigilancia.

Lagunas de Antequera: No están protegidas como espacios naturales y se encuentran en terrenos privados. Estas dos lagunas tienen un gran interés ya que han sufrido una alteración antrópica escasa y sirven de lugar de descanso y alimento de diferentes especies de aves, tales como garzas o flamencos. El mayor impacto que soportan es la presión agrícola, una extensa plantación de nogales que rodea las cuencas de ambas lagunas. Sus aguas, muy dulces, podrían utilizarse para riego en épocas de

sequía, lo cual podría alterar las condiciones ecológicas de manera grave y modificar la dinámica posterior de estos sistemas.



Figura 6.8. Laguna de Caja (noviembre 1997)

Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce: Este complejo lagunar ha sido transformado tras la adecuación del curso bajo del río Guadalhorce. Las lagunas, por tanto, además de ser artificiales, han sido modificadas sustancialmente, con lo que es difícil prever la evolución de su calidad ambiental. Si la gestión ambiental del paraje se hace correctamente, puede que se logre conseguir una zona húmeda bien conservada y protegida, que tenga un importante papel como zona de tránsito de la gran cantidad de especies de aves que la utilizan en la actualidad como última escala europea hacia sus zonas de invernada.

En resumen, todas las lagunas presentan una potencialidad en cuanto a fauna muy elevada, superior a la que en principio parece deducirse de los datos aportados por los censos realizados en algunas de ellas. No obstante, esta afirmación debe ser corroborada por estudios más detallados, en los que se valoren hasta que punto, en condiciones idóneas de conservación, las lagunas presentan diferencias intrínsecas que inciden en sus poblaciones faunísticas. El conjunto de vegetación y fauna conforma un complejo entramado ecológico, en el que las interrelaciones tróficas permiten el flujo energético desde el exterior a las lagunas y de éstas hacia los sistemas terrestres adyacentes.

Las interrelaciones con el espacio que las rodea se ponen de manifiesto en la degradación que han sufrido las orlas litorales de la mayoría de ellas. Este impacto, además de acabar con las zonas de anidamiento y refugio de muchas aves, también puede afectar a la calidad del agua por el aporte de nutrientes, procedentes de la agricultura, que producen eutrofización, con la consiguiente merma de la comunidad macrofítica sumergida y la reducción de la densidad y diversidad de macroinvertebrados.

A escala regional, y sobre todo en lo que se refiere a las aves, estas lagunas forman una unidad funcional en la que estarían incluidas, por lo menos, las lagunas de Campillos, Fuente de Piedra, Ratosa, lagunas del Sur de Córdoba, Honda, Grande y Archidona, ya que la proximidad geográfica permite que las poblaciones usen indistintamente unas u otras lagunas. La potencialidad de este sistema se incrementaría si se incluyeran en el complejo protegido algunas lagunas (como Marcela) que no están protegidas actualmente en la Reserva Natural Lagunas de Campillos. La creación de una "Reserva Natural Lagunas de Antequera", con las lagunas de Caja y Viso, permitiría al menos proteger estas dos lagunas tan características, que actualmente no se encuentran

calificadas como espacio natural, aunque su calidad e importancia ambiental es igual o mayor que la del resto de los sistemas lagunares.

6.3. Plan de seguimiento y control

Selección de los humedales y puntos de muestreo: De acuerdo con los resultados de este estudio, relativos a las características físico - químicas y a la problemática ambiental de las lagunas estudiadas, la relación de humedales en función de las características hidroquímicas del agua y los puntos de muestreo propuestos para la realización de estudios de seguimiento y control de la calidad de sus aguas es el siguiente:

Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra: En esta laguna sería conveniente establecer dos puntos de muestreo, debido a su gran extensión. El primero de ellos debería situarse en el cerro del Palo, localizado en el norte de la laguna y cerca del centro de interpretación de la Reserva Natural, y el segundo en Salinas, al sudeste de la laguna (el mismo que se ha utilizado en este estudio).

Para el control de las aguas subterráneas deberían utilizarse cuatro de los piezómetros instalados en el perímetro lagunar: los denominados piezómetro Herriza, piezómetro Salinas, piezómetro Charcón y piezómetro Vicaria.

Los arroyos Charcón y Santillán (los que aportan un mayor caudal a la laguna) habrían de ser muestreados en los puntos de intersección con la carretera que rodea la laguna.

Reserva Natural Laguna de la Ratosa: La laguna de la Ratosa, aún teniendo una facies hidroquímica semejante a la laguna de Fuente de Piedra (clorurada - sulfatada/sódica), posee unas características genético - funcionales específicas que la convierten en una laguna susceptible de ser incluida dentro de este plan de seguimiento. El punto de muestreo debería localizarse junto al piezómetro instalado en el borde la laguna. También deberían tomarse muestras de agua subterránea.

Reserva Natural Lagunas de Campillos: En esta Reserva se han elegido dos lagunas representativas de los dos tipos hidroquímicos diferentes que encontramos en este complejo: la laguna Dulce (sulfatada - clorurada/sódica y subsalina) y la laguna Salada (clorurada - sulfatada/sódica e hiposalina). La elección es coherente con el hecho de que las características del resto de las lagunas de Campillos son intermedias entre estos dos tipos extremos. Los puntos de muestreo coinciden con los establecidos en este estudio, uno en cada laguna; las muestras de aguas subterráneas deberían muestrearse en el piezómetro de la laguna Dulce, situado cerca de la caseta de observación de la avifauna.

Reserva Natural Lagunas de Archidona: En este complejo debería establecerse un punto de muestreo para este plan de seguimiento en la laguna Grande, aunque sería conveniente poder tomar muestras también en el centro de la misma. Al no existir piezómetros instalados en el borde de esta laguna, sería conveniente realizar al menos una perforación para tener un registro comparativo de las fluctuaciones del nivel en años húmedos y en años secos.

Lagunas de Antequera: De las lagunas de Antequera, la laguna de Caja sería la elegida para realizar el seguimiento en este sector, al ser la más profunda. Si bien su facies hidroquímica (sulfatada – bicarbonatada/cálcica) es diferente a la de la laguna de Viso (bicarbonatada/cálcica), esta última muestra mayores fluctuaciones en la composición química de sus aguas. El seguimiento en este sector, ya sea en una u otra laguna, es importante debido a que constituyen las dos únicas lagunas dulces de la provincia de Málaga.

Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce: El punto de muestreo considerado en este complejo lagunar debería corresponder a la laguna Mayor, aunque hay que tener presente que es importante la diferencia en el contenido salino de las aguas de todas estas pequeñas lagunas, con lo cual sería aconsejable mantener un registro de C.E. del agua en varias de ellas.

Parámetros a analizar: Los parámetros a analizar, para realizar un plan de seguimiento correcto de estas lagunas, serían:

- Parámetros *in situ*: pH, oxígeno disuelto, C.E. y temperatura (del agua y del aire)
- Parámetros medidos en laboratorio: sólidos totales y en suspensión, sílice, aniones y cationes mayoritarios, nitrógeno total, fósforo total, alcalinidad, nitratos, nitritos, amonio y fosfatos.

Sería muy conveniente, en lo que se refiere a metales pesados, realizar campañas de muestreo intensivas (aunque quizá este estudio estaría fuera de los objetivos de este plan de seguimiento y control y tendría que ser objeto de un plan específico), para poder prevenir cualquier fenómeno de contaminación difusa que, dada la gran movilidad que es característica de la avifauna acuática (desplazamientos diarios, por ejemplo, de los flamencos de la laguna de Fuente de Piedra hasta Doñana para alimentarse), podría incluso estar relacionado con el desastre ecológico producido recientemente en Aznalcóllar.

Periodicidad de los muestreos: En estos humedales seleccionados tendría que realizarse, al menos, una campaña de muestreo por estación, para poder así describir los cambios anuales en las características físico – químicas de las aguas de estas lagunas tan fluctuantes.

En relación con las actuaciones propuestas, en función del estado ambiental de los humedales, según lo señalado, las actuaciones propuestas en las lagunas de Málaga son las siguientes:

En primer lugar debería declararse una nueva zona dentro de la Red de Espacios Protegidos de Andalucía, la Reserva Natural “Lagunas de Antequera”, que incluya las lagunas de Caja y Viso y una zona adecuada de protección.

En segundo lugar, debe procederse a la adquisición pública de los terrenos de aquellas lagunas que en la actualidad son de propiedad privada (Camuñas, Cerero, Capacete, Caja, Viso, etc.).

En cuanto a los límites, debería procederse a una redefinición de los límites en la

Reserva Natural "Lagunas de Campillos", según los criterios siguientes:

Utilizar como límite noroccidental el nuevo trazado de la carretera de circunvalación a Campillos, excluyendo de la Z.P.P. (Zona Periférica de Protección) el terreno incluido entre ésta y el casco urbano.

Ampliar el límite de la Z.P.P. en el sector de las lagunas de Camuñas y Dulce.

Incluir en la Z.P.P. la laguna de Marcela, actualmente excluida de la misma.

Por último la, Z.P.P. de las lagunas de Campillos se solapa actualmente con la de la Laguna de Fuente Piedra en un sector amplio, por lo que habría que redefinir el límite Norte de la primera.

La Consejería de Medio Ambiente debe instar a la Dirección General de Urbanismo a incluir en el Catálogo de Elementos y Bienes Protegidos del Plan Especial de Protección de Medio Físico de la Provincia de Málaga a la totalidad (o, en su caso, a las partes) de la Zona de Protección de las Reservas que actualmente no están incluidas en el mismo.

Debe procederse al cegado del canal de desagüe de la laguna de Camuñas para que ésta pueda recuperar su régimen hídrico natural. También deben cesar las prácticas agrícolas de la laguna Dulce para que recupere su extensión y régimen hídrico natural, lo que incluye recuperar la baja salinidad del agua. En el caso de la Laguna Salada debe comprobarse que no se vuelvan a depositar escombros y debe vigilarse para que no se aren los terrenos que naturalmente debiera ocupar la orla litoral. En el caso de Capacete, se debe seguir impidiendo el vertido de la granja de cerdos. En el caso de Cerero, deben retirarse los escombros y, posteriormente, poner en práctica las labores adecuadas de vigilancia para que no se vuelvan a depositar. En el caso de la laguna de Fuente de Piedra, deben depurarse las aguas residuales que circulan por los arroyos Charcón y Santillán para que no contaminen las zonas de la laguna en las que aquéllos desembocan. Deben respetarse los límites de la zona de máxima inundación en la laguna de la Ratosa y abandonarse el cultivo en la estrecha franja de terreno que une esta laguna con la laguna de la Herriza de los Ladrones.

Teniendo en cuenta el estado en que se encuentran algunas de las lagunas declaradas reservas, debería procederse a la retirada de escombros y limpieza en las que no se haya hecho ya, y deberían implantarse sanciones ejemplares al amparo del Art. 26.f de la Ley 2/89 para evitar nuevos vertidos.

Debería reforzarse el actual servicio de guardería y vigilancia sobre estos espacios, que controlara tanto la caza furtiva como los vertidos de escombros, las extracciones de agua, que no se vuelvan a verter aguas residuales de la granja de cerdos a Capacete ni a Fuente de Piedra y el arado excesivo hasta el límite de la línea de agua de los terrenos circundantes de la laguna. También se debería vigilar la pesca y la acampada libre que se producen en las lagunas de Archidona.

Se debe intentar recuperar las orlas de vegetación litoral de prácticamente todas las lagunas, ya que, en mayor o menor medida, todas ellas están afectadas, salvo las lagunas de Archidona, que se encuentran bien conservadas a este respecto. En principio,

se debe dejar que estas orlas evolucionen de forma natural, una vez suprimidos los impactos negativos (arado, vertido de escombros, incendios) que ahora padecen. Si la recuperación natural no fuera suficientemente activa, podría elaborarse un Plan de Restauración con la implantación de rizomas de diversos helófitos adaptados a las características particulares de cada una de las lagunas. También debe favorecerse el desarrollo de la vegetación terrestre natural en una franja perimetral alrededor de cada laguna. Esta vegetación y la orla litoral pueden suponer un filtro efectivo de nutrientes y productos fitosanitarios, de forma que no lleguen al vaso inundable. Debe evitarse la colmatación de los vasos de las lagunas.

En lo que a actividad cinegética se refiere, está prohibido el ejercicio de la misma dentro de los límites de las Reservas. Sin embargo, teniendo en cuenta la presencia de especies protegidas dentro de las Reservas Naturales y su posible confusión con especies cinegéticas, se recomienda la prohibición de caza dentro de todas las Zonas de Protección. Asimismo, se deberá proceder a la delimitación de dichas zonas, con la señalización correspondiente de prohibición del ejercicio de la caza.

En cuanto a las prácticas ganaderas, debe estudiarse la capacidad de carga ganadera de las diferentes zonas, para que no resulte afectada la regeneración de la orla de vegetación, tanto de helófitos como de plantas terrestres de las lagunas. Caso de que, por razones sociales, no pudieran reducirse, habría que realizar un cercado alrededor de las franjas protegidas como Reserva Natural, para evitar el acceso de este ganado.

En cuanto al uso didáctico y turístico - recreativo, la Reserva de Campillos y, sobre todo, la de Fuente de Piedra presentan una cierta capacidad de acogida. No todas las lagunas debieran utilizarse para estos usos, pero las lagunas Dulce, Redonda y Capacete por su proximidad a vías de comunicación relativamente frecuentadas, sí podrían ser adaptadas para ello; de hecho Dulce ya lo está. Si en ellas se establecieran puntos controlados de observación (cerca de las propias vías de comunicación), se conseguiría canalizar una actividad que de todas formas se produciría y se impediría el acceso incontrolado hasta las propias lagunas. En el pueblo de Campillos se podría instalar un Centro de Acogida, donde se explicaran a los visitantes las características de todo el complejo. Respecto a la laguna de Fuente de Piedra, estas actividades (así como otras muy interesantes como las campañas de voluntarios para el anillamiento de pollos de flamenco que realizan en el mes de agosto y tienen una gran demanda del público) se realizan desde hace tiempo, gestionadas por el patronato de dicha Reserva.

En el resto de las lagunas las únicas actividades permitidas deberían ser las correspondientes a la investigación científica y en todas ellas deberían instalarse torretas de observación para realizar los correspondientes censos de aves.

Conforme a lo señalado hasta aquí, las líneas de investigación prioritarias en orden a completar la información actualmente deficitaria y para poder disponer de todos los elementos necesarios para una correcta gestión serían:

Estudio limnológico completo de todas las lagunas para la elaboración de un modelo de funcionamiento de las mismas y de la evolución de las comunidades acuáticas más representativas. Una vez determinados los factores que más inciden en el funcionamiento de cada laguna, se debe establecer un programa de seguimiento y control que permita comprender, tanto las variaciones debidas a los cambios climáticos

interanuales, como el efecto que las medidas correctoras de los impactos negativos tenga en la estructuración de estos ecosistemas.

Se deben completar los inventarios del flora y fauna (invertebrada y vertebrada) del Espacio Protegido, llevar a cabo un análisis de las valencias ecológicas de las especies de mayor interés y elaborar un Plan de seguimiento (mediante censos) de estas poblaciones.

También se debe realizar un estudio de la regeneración de las orlas de vegetación de las lagunas y elaborar, en su caso, un Plan de restauración con las especies más adecuadas.

Finalmente, resulta imprescindible estudiar la regeneración de la laguna de Capacete. Aunque haya cesado el vertido de purines, los sedimentos tienen acumulada, con toda seguridad, una gran cantidad de materia orgánica, lo que probablemente retrasará varios años la recuperación completa de la laguna.

7. Conclusiones

1.- La génesis de los complejos lagunares de la provincia de Málaga está directamente relacionada con el endorreísmo de las cuencas en que se han formado la gran mayoría de estas lagunas. Las lagunas de Adra tienen una génesis asociada a la dinámica litoral y las únicas lagunas formadas a partir de actividades antrópicas son las lagunas del Paraje Natural de la desembocadura del río Guadalhorce (a partir de canteras para la extracción de áridos situadas en el delta del mencionado río).

Las lagunas de Archidona (laguna Grande y laguna Chica) se han formado por procesos poco comunes en nuestro país, ya que ocupan sendas dolinas de hundimiento en el sector kárstico yesífero de Los Hoyos; tan solo en las provincias de Álava (el Lago de Arreo) y de Burgos (las Lagunas de Bárcenas), se encuentran lagunas asociadas a modelos genéticos similares.

2.- El área de máxima inundación de las lagunas estudiadas, salvo en el caso de Fuente de Piedra, es del orden de las decenas de hectáreas. La extensión de las cuencas vertientes suele ser del mismo orden de magnitud que las superficies de inundación correspondientes. La cuenca vertiente de la laguna Honda de Adra incluye tres ramblas de la vertiente sur de la sierra de Gádor, lo cual implica que es mucho mayor que el área de máxima inundación; este hecho determina, en gran medida, que la dinámica hidrológica y las características del agua sean diferentes a las de la cercana laguna Nueva.

3.- La mayoría de los humedales estudiados son poco profundos (no suelen superar los 2 m de profundidad máxima). La relación superficie – volumen es, por tanto, muy elevada, lo que determina una gran amplificación de los cambios ambientales, tanto de componente estacional como aleatoria, de lo que resultan medios no sólo de gran severidad física, sino altamente fluctuantes. Este hecho se observa de manera especialmente notoria en la laguna de Fuente de Piedra (y en otras de menor tamaño como la laguna de Viso): la resuspensión aleatoria y frecuente del sedimento debido a la acción eólica determina una mayor rapidez de ciclado de elementos. Por otra parte, debido también al efecto eólico y a la poca profundidad, estas lagunas se encuentran en una situación de permanente mezcla de la columna de agua, por lo que se han de clasificar como polimícticas según el régimen térmico.

Las lagunas Grande y Chica de Archidona superan la profundidad media de las lagunas de Málaga (la primera llega a tener 12.5 m de profundidad, y la segunda 8.5 m), lo cual determina que su régimen y balance térmico, así como otras características, difiera sustancialmente del mencionado para el resto de las lagunas. En este sentido, los resultados obtenidos a partir de la realización de balances térmicos bihorarios en dos de las lagunas estudiadas indican que, en este tipo de balances, se producen pérdidas y ganancias de energía en el sistema de escala diaria.

4.- En relación con el régimen hídrico y el hidroperiodo, la mayoría de los humedales de Málaga se clasifican como temporales estacionales. El balance hidrológico (y por tanto la duración de la inundación) viene condicionado por la diferencia anual e interanual de la relación Precipitación – Evaporación. Como el clima de la región es mediterráneo con tendencia semiárida, solo aquellas lagunas que poseen

un régimen hidrológico hipogénico, mixto o epigénico – mixto mantienen columnas de agua permanentes o semipermanentes. Como la mayoría se clasifican como epigénicas – mixtas, son lagunas de carácter fluctuante (o temporales – estacionales), con lo cual es necesario realizar registros a largo plazo de los parámetros de diagnóstico elegidos para conseguir estándares robustos de calidad. Las normativas legales establecidas en la comunidad autónoma, nacionales y europeas no son aplicables en la mayoría de los humedales estudiados debido a esta gran variabilidad.

Las lagunas costeras incluidas en este trabajo se clasifican como permanentes según el hidroperiodo; la naturaleza permeable de los materiales sobre los que se formaron (que constituyen sendos acuíferos costeros, tanto en Málaga como en Adra) y la cercanía al mar son las causas de que se las clasifique como hipogénicas según el régimen hídrico

5.- El ciclo hidrológico estudiado forma parte de un periodo anormalmente húmedo ($P = 572$ mm en la región de Málaga, frente a una media de 548 mm) que comenzó en 1995, después de un periodo de sequía de 5 años (1990-94), por lo que los valores de muchas de las variables hidroquímicas registradas en los humedales son excepcionalmente bajos. Podrían servir para determinar rangos inferiores en la determinación de estándares de calidad.

6.- El flujo subterráneo hacia las lagunas de Málaga se supone que sigue un modelo general de tipo radial centrípeto desde las divisorias hidrográficas de las cuencas consideradas (coincidentes con las hidrogeológicas) hacia las correspondientes lagunas. Estas afirmaciones se basan en observaciones realizadas en la cuenca de Fuente de Piedra a partir de mapas de isopiezas establecidos para el flujo en los materiales neógenos y cuaternarios, que implican una circulación de componente subhorizontal relativamente somera. En las lagunas de Archidona se supone un drenaje subterráneo relativamente importante y continuo procedente de acuíferos adyacentes (yesos karstificados del sector de los Hoyos), cuya zona de recarga se debe extender a lo largo de una superficie sensiblemente superior a la cuenca vertiente de la laguna. El resto de las lagunas, por su parte, reciben aportes subterráneos durante los periodos de tiempo en los que los niveles piezométricos en el entorno de las cuencas correspondientes están a mayor cota que la superficie de agua libre, y ocurre al contrario cuando están a menor cota.

En las lagunas de la desembocadura del Guadalhorce, los aportes subterráneos están condicionados por los niveles en el acuífero detrítico aluvial ya que estos sistemas lagunares se relacionan estrechamente con la dinámica hidrogeológica del mencionado acuífero.

Por otra parte, en la laguna de Fuente de Piedra se han obtenido valores de aproximadamente $10 \text{ hm}^3/\text{año}$ para la recarga salina profunda, lo cual es coherente con los balances hídricos realizados anteriormente en el acuífero lo que confirma, al menos parcialmente, los resultados del modelo numérico utilizado.

En las albuferas de Adra el flujo subterráneo en el acuífero detrítico del delta del río Adra se produce hacia el borde costero, siguiendo aproximadamente la traza del cauce principal y también hacia el extremo oriental, donde se localizan las albuferas, con gradientes muy bajos, del orden del 0.2 por mil. La mayor parte de este flujo debe

compensar la salida por evaporación desde las lagunas, por lo que no cabe esperar una descarga significativa de agua desde el acuífero hasta el mar en el entorno de las mismas.

7.- Es arriesgado utilizar la salinidad para clasificar lagunas, como la mayoría de las que se incluyen en el estudio, que llegan a tener salinidades en la fase concentrada hasta 50 veces superiores a las concentraciones en la fase diluida. Los valores medios de salinidad son solo parcialmente significativos como consecuencia de las fuertes fluctuaciones temporales que presenta esta variable. Teniendo esto en cuenta, y habiendo estudiado un ciclo anual húmedo, las lagunas de Málaga son en general lagunas bastante saladas, debido fundamentalmente a la abundancia de las evaporitas en los materiales triásicos que ocupan la depresión de Antequera. Un 60 % de las lagunas son hiposalinas (entre ellas Fuente de Piedra, Salada, Capacete, etc.), un 20% subsalinas (Dulce, Lobón, Grande y Chica), un 10 % dulces (Caja y Viso) y el otro 10 % mixohalinas (en el estudio solo se han contabilizado la Mayor y la del Eucaliptal como litorales, pero hay que tener en cuenta que en este complejo hay varias lagunas más).

8.- En relación con la composición iónica, las lagunas de Málaga estudiadas se pueden clasificar en dos grandes grupos según el anión predominante: cloruradas y sulfatadas. Los bicarbonatos solo tienen una importancia significativa en la laguna de Viso y relativa en la laguna de Caja. De cualquier forma, la alcalinidad de todos los humedales estudiados es muy elevada, por lo que se encuentran bastante protegidos frente a procesos de eutrofización.

En lo que se refiere a los cationes mayoritarios, el sodio y el calcio son los dos más abundantes en los humedales de Málaga. Este último es predominante en los humedales de Archidona (Grande y Chica) y en los de Antequera (Caja y Viso).

9.- A excepción de los humedales caracterizados como hipogénicos, el quimismo de las lagunas de Málaga es altamente dependiente del balance hidrológico anual e interanual, por lo que posee una elevada variabilidad, controlada, básicamente, por factores físicos.

10.- El análisis de las proporciones entre las fracciones inorgánicas solubles de nitrógeno y fósforo, así como de la relación entre el nitrógeno total y el fósforo total, indica que el fósforo es el elemento que con más frecuencia puede limitar el desarrollo de los productores primarios en las lagunas de Málaga. Es excepcional el caso de la laguna de Capacete, del complejo de Campillos, al tratarse de una laguna afectada por contaminación antrópica; el exceso de fósforo determina que sea el nitrógeno el elemento limitante en este caso.

Respecto al estado trófico, predominan los sistemas eutróficos o hipereutróficos (salvo las lagunas de Archidona que son mesotróficas); no obstante, todos los sistemas suelen presentar diferentes grados tróficos según la época que se considere del periodo estudiado.

11.- Cada uno de los grupos genético – funcionales que se han diferenciado en las zonas húmedas de Málaga presenta un tipo patrón hidroquímico característico,

aunque la facies química y la evolución geoquímica del agua de cada laguna dependen en último término de los materiales que constituyen su sustrato litológico y de las características hidrológicas y geomorfológicas de cada cuenca en particular; así, existen diferencias físico – químicas en algunos humedales respecto al grupo del que forman parte. De cualquier modo, el hecho de que los humedales respondan desde el punto de vista hidroquímico y ecológico, a los tipos genético – funcionales preestablecidos, permite cuestionar y replantear las agrupaciones de gestión establecidas para su conservación (Reservas y Parajes Naturales), ya que éstas han sido creadas siguiendo criterios políticos y administrativos y no científicos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALDAYA, F. (1983) *Adra (1057/21-44)*. Mapa Geológico de España. E. 1:50000. IGME, Madrid, 60 p.
- AL-DROUBI, A., FRITZ, B., GAC, J.Y y TAROY, Y. (1980). *Generalized residual alkalinity concept; application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation*. Am. Journal of Science, 280, p. 560-572.
- ALLOWAY, B.J. y AYRES, D. (1993). *Chemical Principles and Environmental Pollution*. Blackie Academic and Profesional, London, 256 p.
- ALMECIJA, C. (1997). *Estudio hidrológico e hidroquímico de los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga*. Tesis doctoral Univ. Granada (inérita), 518 p.
- ALMECIJA, C. y BENAVENTE, J. (1995). *Régimen hidrológico de las lagunas de Campillos (Málaga)*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, XX, p. 325-338.
- ALONSO, M. (1985). *Las Lagunas de la España peninsular : taxonomía, ecología y distribución de los cladóceros*. Tesis doctoral Univ. Barcelona, 795 p.
- ALONSO GARCÍA, E. (1999). Política del agua y gestión de humedales: la experiencia española. *SEHUMED N° 12*, p. 6-8.
- ARMENGOL, J., COMERMA, M., GARCIA, J.C., ROMERO, M., RODRÍGUEZ, J.J., VIDAL, A. (2000). Contribució al coneixement de l'ecologia aquàtica de l'embassament de Sau. Evolució de l'embassament al 1999. *Quaderns ATLL*, 3: 1-97.
- AMA (1991). *Guía de los espacios naturales de Andalucía*. Ed. Incafo, S.A. Madrid, 192 p.
- APPELO, C.A.J. y POSTMA, D. (1983). *Geochemistry, Groundwater and pollution*. Ed. A.A. Balkema. Rotterdam, 536 p.
- ARCHE, A. (1992). *Sedimentología*. Ed. CSIC, Madrid, vol. I, 543 p.
- BAENA, J. y JEREZ, L. (1982). *Síntesis para un ensayo paleogeográfico entre la Meseta y la zona Bética (s.str.)*. IGME. Col. Informe, 256 p.
- BAENA, J., DEL OLMO, A. y CRUZ SAN JULIÁN, J.J. (1986). *Campillos (1022)*. Mapa Geológico de España E. 1:50000. IGME, Madrid, 48 p.
- BAIRD, C. (1995). *Enviromental Chemistry*. Ed. Freeman, New York, 484 p.
- BENAVENTE, J. y CARRASCO, F. (1985). Influence of evaporite karst in the streamwater of the Guadalhorce river (Andalucía, Spain). *Le Grotte d'Italia. 4 (XII) - Proc. Int. Symp. on Evaporite Karst*, p. 39-48.

- BENAVENTE, J. y SANZ DE GALDEANO, C. (1985). Relación de las direcciones principales de karstificación y del termalismo con la fracturación en las cordilleras Béticas. *Estudios Geol.* 41, p. 177-188.
- BENAVENTE, J., ALMECIJA, C., CARRASCO, F., RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, P. y CRUZ SAN JULIÁN, J.J. (1992). Reconocimiento hidroquímico de zonas endorréicas del Karst evaporítico de Antequera (Málaga). *Geogaceta*, 12, p. 50-52.
- BENAVENTE, J., CARRASCO, F., ALMECIJA, C., RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, P. y CRUZ SAN JULIÁN, J.J. (1993). La zona de transición agua dulce-salmuera bajo el borde norte de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga). *Geogaceta*, 14, p. 6-8.
- BENAVENTE, J., ALMECIJA, C. y CARRASCO, F. (1994). Características físico-químicas de las aguas subterráneas en la proximidad de lagos salados. Algunos ejemplos del norte de la provincia de Málaga. En *Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas*, (L.F. Rebollo, ed.). Asoc. Int. Hidrog. - Grupo Esp., t. II, p. 111-122.
- BENAVENTE, J., CRUZ SAN JULIÁN, J.J. y LINARES, L. (1996 a). Use of groundwater for the maintenance of a protected wetland (Fuente de Piedra salt lake, Spain). *Wetlands: a multiapproach perspective* (J.J. Cruz San Julián y J. Benavente, eds.). Univ. Granada, p. 13-24.
- BENAVENTE, J., ALMECIJA, C. y CARRASCO, F. (1986, b). Origin and environmental significance of saline waters in the Antequera region (southern Spain). *Wetlands: a multiapproach perspective* (J.J. Cruz San Julián y J. Benavente, eds.). Univ. Granada, p. 55-68.
- BERNIS, F. y VALVERDE, J.A. (1954). Sur le flamant rose dans la Péninsule Ibérique. *Alanda*, t. XXII, p. 32-39.
- BERNUES, M. (1990). La laguna de Fuente de Piedra (*en Humedales Españoles en la lista del Convenio de Ramsar*, Troya, A. y Bernués, M. coords.: 159-164). Ed. ICONA, Colección Técnica.
- BISCAYE, P.E. (1964). Distinction between kaolinite and chlorite in Recent sediments by X-ray diffraction. *American Mineralogist*, v. 49, p. 1281-1289.
- BRAITSCH, O. (1971). *Salt deposits, their origin and composition*. Springer. Verlag., 279 p.
- BRASSINGTON, R. (1988). *Field Hydrogeology* (Geological Soc. of London handbook). Open University Press, John Wiley y Sons, 175 p.
- BURILLO, F.J. y DURÁN, J.J. (1982). *El Karst en yeso de Gobantes (Antequera-Campillos, Málaga)*. Trabajo monográfico (inédito). Univ. Granada, 54 p.

- BURMAN, R. y POCHOP, L.O. (1994). *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic data*. Developments in Atmospheric Science, 22. Elsevier, 278 p.
- CABANAS, R. (1977). *Estudio hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra y zonas adyacentes*. ICONA (inédito).
- CALAFORRA, J.M. (1996). *Contribución al conocimiento de la karstología de yesos*. Tesis doctoral Univ. Granada (inédita), 350 p.
- CALAFORRA, J.M. y PULIDO, A. (1989). Les gypses triasiques de Fuente Camacho et ses alentours. *Libro guía Reun. Franco-Espagnole sur les karsts méditerranéens* (J.J. Delannoy, F. Díaz del Olmo y A. Pulido eds.), p. 67-82.
- CALDERÓN, S. (1888). La salina de Fuente de Piedra. *Actas de la R. Soc. Esp. Hist. Nat., Sec. de Sevilla.*, t. XVII, p. 72-83.
- CALVO, J., GONZÁLEZ, J.M., GONZÁLEZ, J. y VELLENA, J. (1978). Primeros datos sobre sedimentación de dolomía en la Laguna de Gallocanta (provincias de Zaragoza y Teruel). *Tecniterrae*, 21, p. 6-15.
- CARRASCO, F. (1978). Variación de la salinidad de las aguas del río Guadalhorce. Influencia de las litofacies. *Tecniterrae*, 22, p. 35-41.
- CARRASCO, F. (1986). *Contribución al conocimiento de la cuenca alta del río Guadalhorce el medio físico; hidrogeoquímica*. Tesis doctoral Univ. Granada, 435 p.
- CARRASCO, A., CARRASCO, F., RUIZ-TAGLE, M. y TAUVIN, J.P. (1981). Características hidrogeológicas del acuífero calizo-dolomítico de la unidad Gádor-Lújar en el sector de Berja-Benínar (Almería) y su relación con las Fuentes de Marbella. *Simposio sobre el agua en Andalucía*, Granada. Vol. II, p. 249-268.
- CARRASCO, F., GAVILAN, y RODRÍGUEZ, P. (1993). Evolución química en un año húmedo del agua de la laguna de Fuente de Piedra (prov. de Málaga). VI Congreso Esp. de Limnología, p. 69-74.
- CARRASCO, F. y LUCENA, J. (2000). *Supervisión de las actuaciones realizadas en relación con el Proyecto de Adecuación del tramo bajo del río Gudalhorce (Málaga)*. 36 p, planos, inédito.
- CARRILLO, P., SÁNCHEZ-CASTILLO, P., CRUZ-PIZARRO, L. y MORALES, R. (1996). Cambios cíclicos y tendencias a largo plazo en la salinización de ecosistemas fluctuantes (Albuferas de Adra). Evidencias de eutrfización y contaminación. *Limnética*, 12 (1), p. 59-65.
- CASARES, R. (1932). Análisis de las aguas de Fuente de Piedra. *Anales de la Acad. Nac. de Farmacia*. Madrid, 2 p.

- CASAS, J.J. y VILCHEZ QUERO, A. (1996). Chironomids (Diptera) from ponds with different degree of salinity in the region of Antequera (southern Spain). *Wetlands: a multiapproach perspective* (J.J. Cruz San Julián y J. Benavente, eds). Univ. Granada, p. 25-36.
- CASTANY, G. (1971). *Tratado práctico de las aguas subterráneas*. Ed. Omega, Barcelona, 672 p.
- CASTELLON, L. (1970). *Sobre la sedimentación en la laguna salada de Fuente de Piedra (Málaga)*. Tesis de Licenciatura Univ. Granada (inédita), 82 p.
- CATALÁN, J. (1987). *Limnologia de l'estany Redó (Pirineu Central) : el sistema pelàgic d'un llac profund d'alta muntanya*. Tesis doctoral, Univ. Barcelona, 230 p.
- CEREZUELA, F. (1977). *Evapotranspiración y microclimas de la vertiente mediterránea del sur de España*. Publ. Univ. Málaga, 297 p.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. Y MAYS, L.W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana, Bogotá, 584 p.
- COLE, G. (1983). *Textbook of limnology*. 3ª ed. The C.V. Mosby Company, 401 p.
- COLLINSON, C. y BAXTER, J. (1981). Mississippian Stratotypes. IUGS. (inédito), 56 p.
- COLOMA, P., MARTÍNEZ GIL, F.J. y SÁNCHEZ NAVARRO, J.A. (1997). *Las aguas mineromedicinales de las cuencas riojanas orientales como patrimonio hidrogeológico*. Zubia nº15. p. 55-62.
- COLOMER, J., ROGET, E. y CASAMITJANA, X. (1996). Daytime heat balance for estimating non-radiative fluxes of lake Banyoles, Spain. *Hydrological Processes* 10, p. 721-726.
- COMIN, F.A., ALONSO, M., LÓPEZ, P. y COMELLES, M. (1983). Limnology of Gallocanta lake, Aragón, EN Spain. *Hydrobiología*, 158, p. 237-245.
- COMIN, F.A., y ALONSO, M. (1988). Spanish salt lakes: their chemistry and biota. *Hydrobiología*, 158, p. 237-245.
- COMIN, F.A., JULIA, R., COMIN, M.P. y PLANA, F. (1990). Hydrogeochemistry of lake Gallocanta (Aragón, NE Spain). *Hydrobiología*, 197, p. 51-66.
- CRUZ SAN JULIÁN, J.J. (1974). *Estudio geológico del sector Cañete la Real-Teba-Osuna (Cordillera Bética, región occidental)*. Tesis doctoral Univ. Granada nº 71. Secret. Publ. Univ. Granada, XII, 431 p.
- CRUZ SAN JULIÁN, J.J. y DIVAR, J. (1986) *Osuna (1005/15-41)*. Mapa Geológico de España. E. 1:50000. IGME, Madrid, 50 p.

- CRUZ SAN JULIÁN, J.J. (1990) *Teba (1037/15-43)*. Mapa Geológico de España. E. 1:50000.IGME, Madrid, 89 p.
- CRUZ SAN JULIÁN, J.J. y BENAVENTE, J. eds. (1996). *Wetlands: a multiapproach perspective*. Hydrological and Ecological Studies applied to Wetlands Management in Semiarid Climate. Univ. Granada, 262 p.
- CUSTODIO, E. (1983a). Hidráulica de captaciones de agua subterránea. En *Hidrología subterránea*, 2ª ed. (Custodio, E. Y Llamas, M.R., eds.), t. 1, secc. 8, p. 441-601. Ed. Omega. Barcelona.
- CUSTODIO, E. (1983e). Hidrogeoquímica. En *Hidrología Subterránea*, 2ª ed. (Custodio, E y Llamas, M. R. eds.), t. I, secc. 10, p. 1005-10091. Ed. Omega, Barcelona.
- CUSTODIO, E. (1987). Peculiaridades de la hidrología de los complejos palustres españoles. (en *Bases científicas para la protección de los humedales en España*). R. Acad. C. Ex., Fís. y Nat., Madrid, p. 43-63.
- CUSTODIO, E. (1983). El papel de la hidrología en los programas de restauración de humedales en ambientes fluctuantes. Jornadas técnicas Internacionales sobre *Bases ecológicas para la restauración de Humedales en la Cuenca Mediterránea* (La Rábida, Huelva, junio 1993). Difusión restringida. A.M.A., Junta de Andalucía.
- DANTÍN, J. (1940). La aridez y el endorreísmo en España. El endorreísmo bético. *Estudios Geográficos*, 1, p. 75-117.
- DANTÍN, J. (1944). La laguna endorreica de La Ratosa en Alameda (Málaga). *Estudios Geográficos*, 14, p. 21-26.
- DE HOYOS, C. (1996). *Limnología del Lago de Sanabria: variabilidad interanual del Fitoplancton*. Tesis doctoral Univ. Salamanca, 438 p.
- DE LA ROSA, J. (1992). *Estudio del fitoplancton de varias lagunas de las provincias de Granada y Málaga*. Memoria Lic., Univ. Granada, 215 p.
- DEL RÍO, M.T. (1986). *El ecosistema acuático de las Albuferas de Adra (Almería)*. Estudio pormenorizado de sus componentes. Tesis doctoral, Univ. Granada.
- DICHT, L., LINARES, L. y DEL VALLE, M. (1986). Hidrogeología de la laguna de Fuente de Piedra y su entorno (provincia de Málaga). *II Simp. Agua en Andalucía*, v. II, p. 357-366.
- DIVERSOS AUTORES (1999). *Ecoguía de los espacios naturales de España*. Ed. Revista Hábitat.
- DIVERSOS AUTORES (1992) *Espacios naturales protegidos de Andalucía*. Ed. Incafo. Madrid.

- DIVERSOS AUTORES (1996). *Functional analysis of European Wetland Ecosystems-phase I. The function of river marginal Wetland Ecosystems*. Published by the European Commission. Luxembourg.
- DIVERSOS AUTORES (1991) *Reunión técnica sobre la situación y problemática del Flamenco Rosa en el Medit. Occidental y Africa Noroccidental*. Junta de Andalucía. Consej. de cultura y M. Ambiente.
- DIVERSOS AUTORES (1996). *Plan de Ordenación de Recursos Naturales de la "Reserva Natural Lagunas de Campillos"*. Junta de Andalucía, 123 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRAÚLICAS, M.O.P.T.M.A. (1995). *Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de adecuación del tramo bajo del río Guadalhorce (Málaga)*. Tomo 1a: Documento síntesis. 42 p, planos, inédito
- DPM-ITGE. (1988). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Ed. Diputación Prov. de Málaga, 150 p.
- DURÁN, J.J. (1983). *Estudio geomorfológico de un sector entre Antequera y Archidona (Málaga, Andalucía)*. Trabajo monográfico (inédito) Univ. Granada, 81 p.
- DURÁN, J.J. (1984). Evolución geomorfológica del cañón del río Guadalhorce en el Trías de Antequera (Archidona, Málaga). *Cuad. de Inv. Geográfica*, t. X, fasc. 1 y 2, p. 43-54.
- DURÁN, J.J. y BURILLO, F.J. Triassic gypsum Karst of the Loma del Yesar (Archidona, Málaga, Southern Spain). *Le Grotte d'Italia*. 4 (XII) - Proc. Int. Symp. on Evaporite Karst, p. 237-246.
- DURÁN, J.J., CUENCA ,J. y LÓPEZ MARTÍNEZ, J. (1996). *Un ejemplo de sistematización e inventario del Patrimonio Geológico: el patrimonio kárstico de la provincia de Málaga (Cordillera Bética)*. Geogaceta. 1º. p. 224-227.
- DURÁN, J.J., LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. y BAREA, J. (1997). *Patrimonio geológico y sostenibilidad. Aplicación a la provincia de Málaga*. Zubia nº15, p. 66-71.
- DURÁN, J.J. y MOLINO, J.A. (1986). Karst en yesos del Trías de Antequera (Cordilleras Béticas). *Karstologia Memoires* 1. Association Française de Karstologie, p. 37-46.
- EL AMRANI PAAZA, N. (1997). *Caracterización y modelización hidrogeoquímicas en el acuífero del delta del río Adra (Andalucía, España)*. Tesis doctoral. Univ. Granada, 291 p.
- EUGSTER, H.P. y HARDIE, L.A. (1978). Saline lakes. En Lerman, A., ed., *Physics and chemistry of lakes*. Springer Verlag, p. 237-293.
- EUGSTER, H.P. y JONES, B.F. (1979). Behavior of major solutes during closed-basin brine evolution. *American Journal of Science*, v. 279, p. 609-631.

- FABIAN, D. (2002). *Diversidad, composición funcional y estructura de tamaños del plancton en un sistema eutrófico y otro hipereutrófico: las Albuferas de Adra (Almería)*. Tesis doctoral, Univ. Granada, 149 p.
- FERRER, J., GARCÍA, L. y PURROY, F. (1976). Informe sobre el flamenco en España y su población en 1974. *Bol. Est. C. Ecología*, nº 5, p. 55-72.
- FETTER, C.W. Jr. (1994). *Applied Hydrology, third ed.* Prentice-Hall, 691 p.
- FOUCAULT, A. (1966). Le diapirisme des terrains triasiques au Sécondaire et au Tertiaire dans le Subbétique du NE de la province de Grenade (Espagne méridionales). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), VII, p. 527-536).
- FREEZE, R.A y CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, 604 p.
- FUREST, A. y TOJA, J. (1984). Reconocimiento limnológico de lagunas andaluzas. *Las zonas húmedas de Andalucía*. Monografías Dirección General del Medio Ambiente, MOPU, p. 177-188.
- GARCÍA, C.M. (1991). *Estudio de un medio acuático fluctuante: la laguna atalasohalina de Fuente de Piedra (Málaga)*. Tesis doctoral Univ. Málaga (inédita) 300 p.
- GARCÍA JIMÉNEZ, C.M., GARCÍA RUIZ, R. y GAVILAN, I. (1991). *Estudio y seguimiento del medio acuático de la Reserva Natural "laguna de Fuente de Piedra" DURÁNte un año extraordinariamente lluvioso (1989-1990)*. Informe para la AMA (inédito). Exp. 745/90. Dpto. Ecología Univ. Málaga, 65 p.
- GARCÍA-LÓPEZ, S. (1996). *Los acuíferos carbonatados alpujárrides al SE de Sierra Nevada. Hidrodinámica, hidrología isotópica y cartografía de las aguas subterráneas*. Tesis doctoral, Univ. Granada, 492 p.
- GARCÍA ROSSELL, L. (1973). *Estudios geológicos de la transversal Úbeda-Huelma y sectores adyacentes*. Tesis doctoral Univ. Granada (inédita), 549 p.
- GARRIDO, M.; ALBA, E.; PLATA, J. y GIL DE SOLA.,L. (1991). *La desembocadura del Guadalhorce. Valores ambientales y propuestas para su gestión y mejora*. Jornadas de zonas húmedas andaluzas. 129-133 p.
- GÓMEZ NIETO, M.A. (1994). *Estudio Comparativo de indicadores de contaminación fecal aislados en los sistemas lagunares de Antequera (Málaga)*. Tesis de licenciatura Univ. Granada (inédita), 119 p.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F. (1987). Las zonas encharcables españolas: el marco conceptual (en *Bases científicas para la protección de los humedales en España*). R. Acad. C. Ex., Fís. y Nat., Madrid, p. 9-30.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F. (1988). Typology of wetlands and evaluation of the resources they represent. *Intern. Symp. on Hydrology of Wetlands in semiarid and arid regions*, p. 7-36.

- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F. y MONTES, C. (1989). *Variedad de los humedales mediterráneos: bases para una clasificación genético-funcional*. Seminar on the management of Mediterranean Wetland. Doñana National Park, 32 p.
- GOSSELINK y TURNER (1978). The Role of Hydrology in Freshwater Wetland Ecosystems. *Freshwater Wetlands: Ecological Processes and Management Potential*. Academic Press Inc, New York, NY.
- GOODE, D.J., y KONIKOW, L.F. (1989). *Modification of a method-of-characteristics solute-transport model to incorporate decay and equilibrium-controlled sorption or ion exchange*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4030, 65 p.
- GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (1998). *Estudio hidrogeológico del Bajo Guadalhorce para la captación de agua salobre para la planta desaladora de Málaga*. 87 p. anejos y planos (inédito).
- HAMMER, U.T. (1986). *Saline lake ecosystems of the world*. Dr W Junk Publ., Dordrecht, 616 p.
- HARDIE, L.A. (1968). The origin of the recent non-marine evaporite deposit of Saline Valley, Inyo County, California. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 32, p: 1270-1301.
- HARDIE, L.A., SMOOTH, J.P. y EUGSTER, H.P. (1978) Saline lakes and their deposits: A sedimentological approach. En Matter A. y Tucker, M.E. ed., *Modern an ancient lake sediments, Spec. Publ. Int. Assoc. Sedim.*, 2, p. 7-41.
- HENDERSON-SELLERS, B. (1986). Calculating the surface energy balance for the lake and reservoir modeling: a review. *Reviews of Geophysics* 24(3), p. 625-649.
- HERCZEG, A.L., BARNES, C.J., MACUMBER, P.G. y OLLEY, J.M. (1982). A stable isotope investigation of groundwater-surface water interactions at Lake Tyrrell, Victoria, Australia. *Chemical Geology*, 96, p. 19-32.
- HURLBERT, S.H. (ed.) (1993). *Saline lakes V (Developments in Hydrobiology, 87)*. Kluwer Acad. Publ., 335 p.
- HUTCHINSON (1957). *A treatise on Limnology*. New York: John Wiley y Sons Inc., 1015 p.
- IDSO, S. B. (1981). A set of equations for full spectrum and 8- to 14 um and 10.5- to 12.5- um thermal radiation from cloudless skies. *Water Resources Research*. 17(2): 295-304.
- IGME (1975). *Estudio hidrogeológico de la cuenca Sur*. Informe técnico IX. Cuenca del Adra, Adaro.
- IGME (1977). *Estudio hidrogeológico de la cuenca Sur-Almería*. Informe técnico IX. Adra, 145 p.

- IGME (1981). *Investigación hidrogeológica en las cuencas del sur de España (sector occidental)*. Colección Informe Serv. Publ. Minist. Industria y Energía, Madrid, 78 p.
- IGME (1982). *Síntesis de datos hidrogeológicos y de calidad de aguas subterráneas destinado al plan hidrogeológico nacional*. Cuenca Sur, sector oriental. Tomo 2. Ind. Com. En. Rec. Nat.
- ITGE (1998). *Hidrogeología de la Reserva Natural de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*. Ministerio de Medio Ambiente, 79 p.
- ITGE (1998). *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. ITGE, Junta de Andalucía, Consejería de Obras Públicas y Transportes, 216 p.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D. y ALLEN, R.G. (ed) (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Eng. Pract., No. 70, Am. Soc. Civil Engrs., New York, 360 p.
- KONIKOW, L.F., y BREDEHOEFT, J.D. (1978). *Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources. Investigations, book 7, chap. C2, 90 p.
- LAST, W.M. y SCHWEYEN, T.H. (1983). Sedimentology and geochemistry of saline lakes of the Great Plains. *Hydrobiología*, 105, p. 245-263.
- LEITCH (1989). Politicoeconomic overview of prairie potholes, in *Northern Prairie Wetlands*, A.G. van der Valk, ed., Iowa State University Press, Ames, Iowa, pp. 3-14.
- LEMEUR, R. y ZHAND. (1990). Evaluation of three evapotranspiration models on terms of their applicability for an arid region. *J. Hydrol.* 114, p. 395-411.
- LEVEQUE, R. (1960). Una visita a la laguna de Fuente de Piedra (Málaga). *Ardeloa*, nº 6, p. 344-347.
- LHÉNAFF, R. (1981) . *Recherches géomorphologiques sur les Cordillères Bétiques centro-occidentales (Espagne)*. Thèse Univ. Lille III, 2., 713 p.
- LINARES, L. (1988). La laguna de Fuente de Piedra (Málaga). Hidrogeología y evolución del acuífero relacionado con ella. *Intern. Symp. on hydrology of wetlands in semiarid and arid regions*, p. 99-102.
- LINARES, L. (1990). *Hidrogeología de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*. Tesis doctoral Univ. Granada (inédita), 343 p.
- LINARES, L. y DEL VALLE, M. (1986). Relaciones entre la laguna de Fuente de Piedra y la piezometría de los acuíferos de la cuenca (provincia de Málaga). . *II Simp. Agua en Andalucía*, v. II, p. 345-355.

- LINARES, L., RIVERA, A. y TRENADO, L. (1986). Hidroquímica de los acuíferos de la cuenca de Fuente de Piedra (Málaga). *II Simp. Agua en Andalucía*, v. II, p. 113-124.
- LINARES, L. LÓPEZ-GETA, J.A. y RUBIO, J.C. (1989). Consecuencias Hidrogeológicas de la explotación de los acuíferos en la cuenca de Fuente de Piedra (Málaga). En *La sobreexplotación de acuíferos*. AIH (GE) - AEHS, p. 561-575.
- LLAMAS, M.R. (1984). Peculiaridades de los sistemas hídricos de las zonas húmedas (en *Las zonas húmedas en andalucía*). Monografías Direct. Gral. Medio Ambiente, MOPU, p. 189-189.
- LÓPEZ, P. (1983). *Aguas salinas epicontinentales próximas a la costa mediterránea española. Estudio del medio*. Tesis doctoral, Univ. Barcelona.
- LÓPEZ, F., coordinador (1984). Modelos y metodologías para el cálculo de escorrentías (unidad temática 3, en *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*: 83-111). Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- LÓPEZ, B. (1993). Aspectos ambientales del Plan Hidrológico Nacional. Jornadas técnicas Internacionales sobre *Bases ecológicas para la restauración de Humedales en la Cuenca Mediterránea* (La Rábida, Huelva, junio 1993). Difusión restringida. A.M.A., Junta de Andalucía.
- LYON, J.G. (1993). *Wetland Identification and Delineation*. Lewis Publishers, 157 p.
- MALTBY (1986). *Waterlogged wealth: why waste the world's wet places?*. Earthscan, London, 200 p.
- MARGALEF, R. (1983). *Limnología*. Ed. Omega, Barcelona, 1010 p.
- MARGALEF-MIR, R. (1981). *Distribución de los macrófitos de las aguas dulces y salobres del E y NE de España y dependencia de la composición química del medio*. Fundación Juan March, Madrid, 62 p.
- MARTÍN ROSALES, W. (1997). *Efectos de los diques de retención del borde meridional de la Sierra de Gádor (Almería)*. Tesis doctoral Univ. Granada, 266 p.
- MARTÍN SERRANO, A. (1986 a). *Antequera (1023/16-42)*. Mapa Geológico de España. E. 1:50000. IGME, Madrid, 48 p.
- MARTÍN SERRANO, A. (1986 b). *Benamejí (1006/16-41)*. Mapa Geológico de España. E. 1:50000.IGME, Madrid, 46 p.
- MARTÍN VIVALDI, M.E. (1991). *Estudio hidrográfico de la "Cuenca Sur" de España*. Serv. Publ. Univ. Granada, Monogr. "Tierras del Sur", 285 p., 4 mapas anexos.

- MARTÍNEZ, L., SOLE, T. y CARRERA, J. (1995). Corrección de la evaporación calculada por Thornthwaite. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX, p. 31-46.
- MARTÍNEZ TOLEDO, M.V., GÓMEZ, M.A., CALVO, C., LÓPEZ, L. y GONZÁLEZ LÓPEZ, J. (1996). Microbiological aspects of nitrification and denitrification in seven protected wetlands in the Antequera area (Spain). *Wetlands: a multiapproach perspective* (J.J. Cruz San Julián y J. Benavente, eds.). Univ. Granada, p. 47-54.
- MARTÍNEZ-VIDAL, J.L. y CASTRO, H. (eds.) (1991). *Las albuferas de Adra: estudio integral*. Instituto de Estudios Almerienses, Almería, 314 p.
- MEYBECK, M. (1990). *Global freshwater quality Global environment monitoring systems : A first assessment*. Oxford : World Health Organization, 306 p.
- MINER-MOPTMA (1995). *Libro blanco de las aguas subterráneas*. Serie monografías. Ed. Secret. Gral. Tec. Centro de Publ. MOPTMA, 135 p.
- MINGARRO, F., ORDOÑEZ, S., LÓPEZ, M.C. y CARCIA DEL CURA, M.A. (1981). Sedimentología de las lagunas de Los Monegros y su entorno geológico. *Bol. Geol. Min. XCII-II*, p. 171-195.
- MMA (2000). *El libro blanco del agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 637 p.
- MONTEALEGRE L.C. (1976). *Mineralogía de sedimentos y suelos (Depresión del Guadalquivir)*. Tesis doctoral Univ. Granada.
- MONTEALEGRE, R. y OCAÑA, A. (1996). Nematological study of atalashaline lakes in the Antequera region (Málaga, Spain). *Wetlands: a multiapproach perspective* (J.J. Cruz San Julián y J. Benavente, eds.). Univ. Granada, p. 37-46.
- MONTES, C. (1995). La gestión de los humedales españoles protegidos: conservación vs confusión. *El campo, Serv. Est. BBV*, nº 132, p. 101-128.
- MONTES, C. y MARTÍNO, P. (1987). Las lagunas salinas españolas (en *Bases científicas para la protección de los humedales en España*). R. Acad. C. Ex., Fís. y Nat., Madrid, p. 95-143.
- MOYA, J.L. (1988). *Hidrología de las zonas húmedas del sur de la provincia de Córdoba*. Tesis doctoral Univ. Córdoba (inédita), 274 p.
- MOYA, J.L. y TORRES, J.A. (1983 a). Las lagunas del sur de la provincia de Córdoba (España): situación actual. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VIII, p. 519-525.
- MOYA, J.L. y TORRES, J.A. (1983 b). La laguna de Zoñar: problemática y alternativas de solución. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VIII, p. 527-534.

- MOYA, J.L., RECIO, J.M. y GIRALDEZ, J.V. (1986). Determinación del flujo base en lagunas endorréicas. *II Simp. Agua en Andalucía*, v. I, p. 185-196.
- MUÑOZ HIDALGO, F. y GARCÍA CAÑERO, A.R. (1983). *Historia de Fuente de Piedra*. Ed. Ajalvir (Madrid), 206 p.
- NIELL, F.X. y LUCENA, J. (1986). Comentarios sobre un sistema único: la laguna de Fuente de Piedra. Ideas de cómo planificar su investigación y su uso. *Oxyura*, v.III, nº1, p. 35-42.
- ODUM, E. (1984). *Ecología*. 3a. ed. /15a. reimp.; Interamericana, México, 539 p.
- ORTEGA HUERTAS, M. (1979). *Mineralogía de la "Block Formation" (Depresión de Granada)*. Tesis doctoral Univ. Granada, 497 p.
- PARDO, L. (1948). *Catálogo de los lagos de España*. Biología de las aguas continentales VI. Minist. de Agric. Inst. Forest. Inv. y Exp., Madrid nº41, 523 p.
- PENMAN, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London Ser. A*. 193, p. 120-145.
- PÉREZ FRAILE L.G. *Guía turística de los parques naturales Andaluces*. Ed. "Acción Divulgativa S.L." Madrid 1992.
- PÉREZ GONZÁLEZ, S. y GONZÁLEZ GARCÍA, F.J. (1981). Acuíferos en el Triás de facies germano-andaluza. *I Simp. Agua Andalucía*, v. I, p. 371-378.
- PÉREZ LÓPEZ, A. y SANZ DE GALDEANO, C. (1994). Tectónica de los materiales triásicos en el sector central de la Zona Subbética (Cordillera Bética). *Rev. Soc. Geol. España*, 7 (1-2), p. 141-153.
- PEYRE, Y. (1962). El subbético con Jurásico margoso o Subbético meridional, como unidad paleogeográfica y tectónica de las Cordilleras Béticas. *Not. y Com. IGME*. nº67, p. 133-144.
- PEYRE, Y. (1974). *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères Bétiques), Espagne*. Thèse. Univ. París, 250 p.
- PEZZI, M. (1977). *Morfología Kárstica del sector central de la Cordillera Subbética*. Tesis doctoral. Cuad. Geogr. Univ. Granada, S.M. 2, 289 p.
- PINEDA (1991). *Archidona (1024/17-42)*. Mapa Geológico de España. E. 1:50000.IGME, Madrid, 73 p.
- PLUMMER, L.N., PARKHURST, D.L., FLEMING, G.W. y DUNKLES, S.A. (1988). *A computer program incorporating Pitzer's equations for calculation of geochemical reactions in brines*. U.S. Geol. Surv-water Resources Invest. Report, 93 p.

- PUEYO, J.J. (1978). La precipitación evaporítica actual en las lagunas saladas del área: Bujaraloz, Sástago, Caspe, Alcañiz y Calanda (provincias de Zaragoza y Teruel). *Rev. Inst. Inv. Geol. Diput. Prov. Barcelona*, 33, p. 5-56.
- PUEYO, J.J. (1991). Cloruros. Facies y geoquímica. en *Génesis y formaciones evaporíticas*. Modelos andinos e ibéricos (Coord. J.J. Pueyo). Univ. Barcelona, p. 119-127.
- PUEYO, J.J. y de la PEÑA, J.A. (1991). Los lagos salinos españoles. Sedimentología, hidroquímica y diagénesis. En *Génesis de formaciones evaporíticas*. Modelos andinos e ibéricos (Coord. J.J. Pueyo). Univ. Barcelona, p. 164-192.
- PULIDO, A., BENAVENTE, J., CASTILLO, A. y PADILLA, A. (1986). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Adra*. Dpto. Hidrogeología, Univ. Granada, Mem. Inédita, 56 p.
- PULIDO, A., BENAVENTE, J. y MORALES, G. (1988). Hidrogeología del delta del río Adra. *Estudios Geológicos*, 44, p. 429-443.
- PUY, J.L. (1979). *Mineralogía y geoquímica del triás de la zona subbética de Huelma (Jaen)*. Tesis doctoral, Univ. Granada, 531 p.
- RAMÍREZ, A. y DRAGO, J. (1998). *Doñana*. Interiores – Manuscrito, 112 p.
- RENDÓN, M. (1996). *La laguna de Fuente de Piedra en la dinámica de la población de flamencos del Mediterráneo Occidental*. Tesis doctoral, Univ. Málaga, 200 p.
- RENDÓN, M. y JOHNSON, A.R. (1996). Management of Nesting Sites for Greater Flamingos. *Colonial Waterbirds* 19 (Special Publication 1), p. 167-183.
- REY BENEGAS J.M. *Aguas Subterráneas y Ecología. Ecosistemas de descarga de los acuíferos en los Arenales*. ICONA-CSIC 1991.
- REYNOLDS, C. (1993). *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge, 384 p.
- ROBINSON, G.W. (1922). A new method for mechanical analysis of soil and other dispersión. *J. Agr.Ac.* nº 12, p. 306-321.
- RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, P., CARRASCO, F., BENAVENTE, J. y ALMECIJA, C. (1993). Mineralogía de los sedimentos de la laguna de Fuente de Piedra (provincia de Málaga). *Geogaceta*, 14, p. 18-20.
- SALHOTRA, A.M., ADAMS, E.E. y HARLEMAN, D.R.F. (1987). The alpha, beta, gamma of evaporation from saline water bodies. *Water Resour. Res.*, 23(9), p. 1769-1774.
- SALHOTRA, A.M., ADAMS, E.E. y HARLEMAN, D.R.F. (1995). Effect of salinity and ionic composition on evaporation: Analysis of Dead Sea evaporations pans. *Water Resour. Res.*, 21(9), p. 1336-1344.

- SÁNCHEZ-CASTILLO, P. (1984). *Estudio limnológico de dos ecosistemas hídricos de la provincia de Almería*. Exma. Diputación Provincial de Almería.
- SÁNCHEZ-CASTILLO, P. (1987). Influencia de la salinidad sobre las poblaciones algales de tres lagunas litorales (Albuferas de Adra, Almería). *Limnética* 3, p. 47-53.
- SÁNCHEZ NAVARRO, J.A., MARTÍNEZ GIL, F.J., DE MIGUEL, J.L. y SAN ROMAN, J. (1989). Hidrogeoquímica de la zona endorréica de las lagunas de Monegros, provincias de Zaragoza y Huesca. *Bol. Geol. Min.* v. 100-5, p. 876-885.
- SÁNCHEZ TORIBIO, M.I. (1992). *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*. Cuadernos Técnicos de la S.G. N°3. Soc. Esp. Geom. Geoforma Ediciones. Logroño.
- SHUTTLEWORTH, W.J. (1993). Evaporation (cap. 4). En D.R. Maidment (ed. in chief), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Incl., 53 p.
- SOLE, J., CARRERA, J. y GALARZA, G. (1995). Modelos de evapotranspiración potencial: revisión y propuesta de clasificación. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX, p. 19-30.
- SURGE S.L. y OMICRON S.A. (1995). *Informe complementario al Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de adecuación del tramo bajo del río Guadalhorce (Málaga)*. 20 p y anejo, inédito.
- TELLO, B. Y LÓPEZ BERMUDEZ, F. (1988). *Guía física de España. 4. Los Lagos*. Alianza Editorial. Madrid, 264 p.
- TROYA, A. y BERNUES, M. (coords.) (1990). *Humedales españoles en la lista del Convenio de Ramsar*. ICONA, Colecc. Técnica, Madrid, 337 p.
- TYURIN, I.V. (1951). *Analytical procedure for a comparative study of soil humus*. Trudy Pochr. Inst. Dokuchaev.
- USEPA (1992). *Clean water action plan restoring and protecting America's waters*. U.S. Environmental Protection Agency and U.S. Dept. of Agriculture. 89 p.
- VARGAS, J.M., BLASCO, M. y ANTUNEZ, A. (1983). *Los vertebrados de la laguna de Fuentepiedra (Málaga)*. Monografías ICONA, 28, Madrid, 228 p.
- VIDONDO, B., MARTÍNEZ, B., MONTES, C. y GUERRERO, M.C. (1993). Physicochemical characteristics of a permanent Spanish hypersaline lake: La Salada de chiprane (NE Spain). *Hidrobiología*, 267, p. 113-125.
- WETZEL, R.G. (1981). *Limnología*. Ed. Omega, Barcelona, 679 p.
- WILLIAMS, M. (1990). *Wetlands: A Threatened Landscape*. Blackwell, 419 p.

WILLIAMS, W.D. (1981). Inland salt lakes: An introduction. *Hydrobiologia*, 81, p: 1-14.

WILLIAMS, W.D. (1986). Limnology, the study of inland waters: a comment on perceptions of studies of salt lakes, past and present. In P. De Deckker y W.D. Williams (eds.), *Limnology in Australia*. Dr. W. Junk Publishers. Dordrecht.

WILLIAMS, W.D. (1993). Conservation of salt lakes. *Hydrobiologia*, 267, p. 291-306.

WINTER, T.C. (1976). *Numerical simulation analysis of the interactions of lakes and groudwaters*, U.S. Geol. Survey Professional Paper 1001.

WINTER, T.C. y LLAMAS, M.R. (ed.) (1993). Hydrogeology of wetlands. *J. of Hydrology*, 141 (1-4), p. 1-271.